
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy

„Multi-stack“ piezoelektrické keramické aktuátory a jejich parametry

„Multi-stack“ piezoelectric ceramic actuators and their properties

Bakalářská práce

Autor:	Petr Mudra
Vedoucí práce:	Doc. Mgr. Jiří Erhart, Ph.D.
Konzultant:	Doc. Ing. Pavel Mokrý, Ph.D.

V Liberci 13. 5. 2007

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Katedra: fyziky

Akademický rok: 2006/2007

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení: **Petr Mudra**

Studijní program: B 2612 - Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612R011 - Elektronické informační a řídicí systémy

Vedoucí katedry Vám ve smyslu zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. určuje tuto bakalářskou práci:

Název tématu: **„Multi-stack“ piezoelektrické keramické aktuátory a jejich parametry**

Zásady pro vypracování:

1. Piezoelektrická keramika, její vlastnosti a použití
2. Design „multi-stack“ piezoelektrických keramických aktuátorů a jejich parametry (posunutí, síla, rezonanční frekvence)
3. Připravit vzorky „multi-stack“ piezoelektrických keramických aktuátorů
4. Měření parametrů „multi-stack“ piezoelektrických keramických aktuátorů

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace

Rozsah průvodní zprávy: cca 40 stran

Seznam odborné literatury:

[1] J.Erhart: Piezoelektrické "chytré" materiály pro elektrotechniku, PZT keramika
Elektro 11 (2002) 4-7

[2] C.Niezrecki, D.Brei, S.Balakrishnan, A.Moskalik: Piezoelectric Actuation: State of
the Art, The Shock and Vibration Digest 33, 4 (2001) 269-280

[3] Piezoelectric ceramics: Principles and Applications, APC International Ltd., 2002

[4] J.Erhart: Tloušťkově rozpínavé a tloušťkově střížné kmity piezoelektrických
keramických rezonátorů, studijní text

Vedoucí bakalářské práce: Doc.Mgr.Jiří Erhart, Ph.D.

Konzultant: Doc.Ing.Pavel Mokřý, Ph.D.

Zadání bakalářské práce: 31.10.2006

Termín odevzdání bakalářské práce: **18.5.2007**





Vedoucí katedry



Děkan

V Liberci dne 31.10.2006

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **souhlasím** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

7.5.2007
.....

Podpis


.....

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval všem, bez kterých by tato práce nemohla vzniknout. Především mému vedoucímu bakalářské práce Doc. Mgr. Jiřímu Erhartovi Ph.D. za poskytnutí konzultací, potřebných materiálů a rad při řešení této práce. Dále děkuji Doc. Mgr. Ludmile Burianové, CSc. za poskytnutí laboratoře k měření.

Abstrakt

Práce se zabývá vlastnostmi piezoelektrické keramiky a její použitelnosti v piezoelektrických aktuátorech. Zaměřuje se na design piezoelektrických aktuátorů zvaný „multi-stack“, který je složen z několika na sobě navrstvených piezoelektrických keramických destiček.

Část práce se zabývá teoretickým výpočtem rezonanční frekvence v závislosti na počtu navrstvených piezoelektrických keramických destiček. Experimentálně sestavené multi-stacky, s různými počty a tvary navrstvených piezoelektrických keramických destiček jsou vyhodnoceny v rámci rezonanční frekvence a generované výchylky v závislosti na budícím elektrickém napětí. Peak-to-peak výchylky 4 až 10vrstevných multi-stacků pro elektrická napětí 400-800 V byly naměřeny v rozsahu 1-9 μm .

Abstract

Main aim of this Bachelor thesis are the properties of piezoelectric ceramics and their application in piezoelectric actuators. Work is focused on the design of „multi-stack“ piezoelectric actuators, which are built by the stacked piezoelectric ceramic plates.

Part of the work is devoted to the theoretical calculation of resonant frequency as a function of the number of stacked piezoelectric ceramic plates. Set of multi-stack actuators has been prepared for different numbers and shapes of stacked plates. Resonant frequency and displacement as a function of applied voltage was measured. Peak-to-peak displacements for 4-10 layers multi-stack and applied voltages 400-800 V were found in the range 1-9 μm .

Obsah

Zadání bakalářské práce.....	2
Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Abstrakt.....	6
Obsah.....	7
1	Piezoelektrina 8
2	PZT keramika, její vlastnosti a použití 8
2.1	Výroba PZT keramiky 12
2.2	Měkké keramiky versus tvrdé keramiky 13
2.3	Koeficienty piezoelektrických materiálů 14
2.3.1	Piezoelektrický nábojový koeficient 15
2.3.2	Permitivita 15
2.3.3	Elastická konstanta 16
2.3.4	Koeficient elektromechanické vazby 16
2.3.5	Koeficient dielektrických ztrát 17
2.3.6	Rezonanční a antirezonanční frekvence 17
2.4	Stabilita PZT materiálu 18
3	Úvod do aktuátorů 18
3.1	Externí mechanismy s multi-stack aktuátory 20
3.1.1	Aktuátor s hydraulickým mechanismem 20
3.1.2	Pružné (flextensional) aktuátory 20
3.1.3	Kinematický mechanismus 22
3.2	Aktuátory využívající vlivu frekvence 22
3.3	Multi-layer aktuátory 23
3.4	Multi-stack aktuátory 25
3.5	Multi-stack pseudo-střížné aktuátory 27
4	Tloušťkově rozpínavé kmity multi-stack aktuátorů 28
5	Příprava vzorků multi-stack aktuátorů 32
6	Měření parametrů multi-stack aktuátorů 34
7	Výsledky měření multi-stack aktuátorů 37
7.1	Měření rezonanční frekvence 37
7.2	Měření výchylky 41
8	Diskuze a chyby měření 46
9	Závěr 48
10	Příloha 49
10.1	Grafy - měření impedančního spektra 49
10.2	Grafy - měření výchylky 52
11	Literatura 60

1 Piezoelektrina

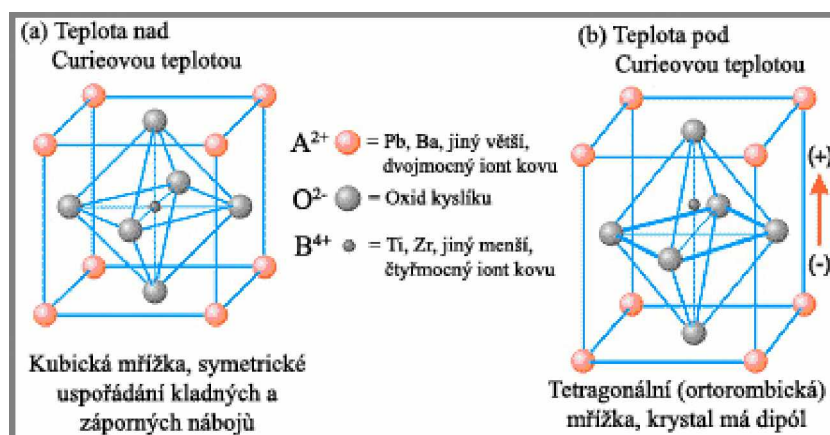
Jacques a Pierre Curieovi objevili v roce 1880 zvláštní charakteristiky určitých krystalických minerálů. Při vystavení mechanickému namáhání, se krystal elektricky polarizoval a natahování nebo stlačování materiálu generovalo napětí nesouhlasné polarizace v poměru k aplikovanému namáhání. Naopak, když byl krystal vystaven elektrickému poli, docházelo k prodlužování a kontrakcím, podle polarizace pole a přímo úměrně s intenzitou elektrického pole. Toto chování bylo označeno jako přímý piezoelektrický a inverzní piezoelektrický jev.

Přímý piezoelektrický jev je využit v senzorických aplikacích, jako snímače síly nebo posunutí. Inverzní piezoelektrický jev je použit v motorech, zařízeních s přesným polohováním a generování zvukových nebo ultrazvukových signálů [5].

2 PZT keramika, její vlastnosti a použití

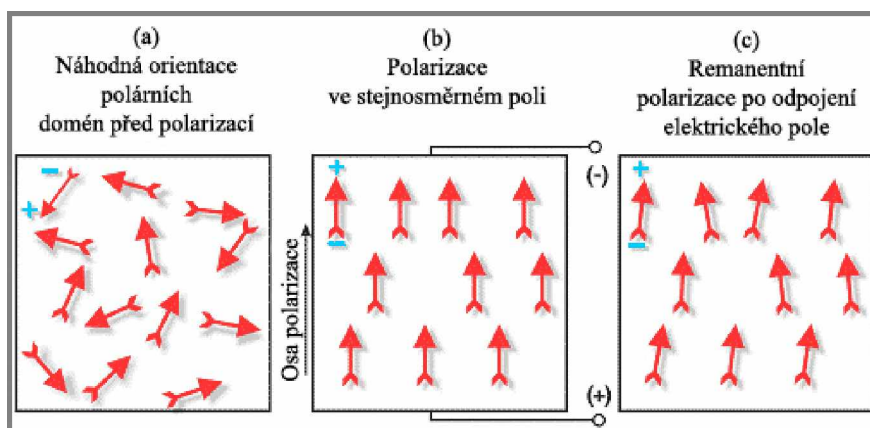
PZT keramiky vyráběné z tuhých roztoků zirkoničitanu olovnatého (PbZrO_3 , zkráceně PZ) nebo titaničitanu olovnatého (PbTiO_3 , zkráceně PT) vykazují větší citlivost a vyšší provozní teplotu (vztaženo ke keramikám jiných složení), proto jsou tyto materiály aktuálně nejpoužívanější průmyslově vyráběné feroelektrické keramiky. Keramiky obsahují nejčastěji 48 až 52 % PZ. Čistý PT je feroelektrický s tetragonální symetrií (4 mm), čistý PZ je zmiňován jako feroelektrický s trigonální symetrií (3 m), popř. anti-feroelektrický s ortorombickou symetrií. Obě látky procházejí fázovým přechodem z paraelektrické kubické fáze ($\bar{m}3m$) a mají perovskitovou strukturu (**obrázek 2.1**). Kolem koncentrace 48 % PZ se nachází tzv. morfotropní fázová hranice (MPB). Což je oblast chemických složení tuhých roztoků, kdy v širokém teplotním rozsahu existují společně dvě fáze. Pro složení v blízkosti MPB jsou materiálové vlastnosti nejvýhodnější [1].

Důležitým parametrem pro použití PZT keramiky je Curieova teplota. Při této teplotě (teplotě fázového přechodu) prochází PZT keramika do paraelektrické (nepiezoelektrické) fáze. Všechny krystaly s perovskitovou strukturou mají v paraelektrické fázi jednoduchou kubickou symetrii bez dipólového momentu (**obrázek 2.1a**). Je nutné PZT keramiku polarizovat, „srovnat“ v materiálu směry spontánních polarizací v zrnech co nejvíce do jednoho směru, protože PZT keramika není před polarizací makroskopicky piezoelektrická (nahodilé uspořádání zrn).



Obrázek 2.1 - Perovskitová struktura PZT keramiky [5]

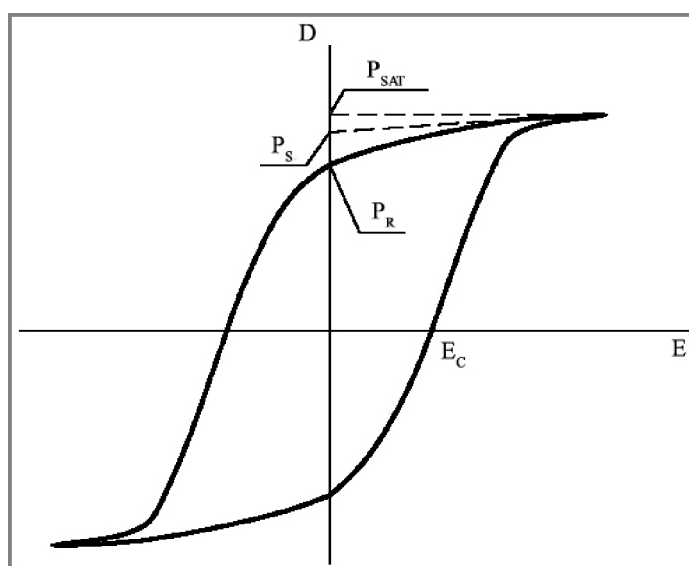
Při teplotách pod Curieovou teplotou, má každý krystal tetragonální nebo rhombohedrální symetrii a dipólový moment (**obrázek 2.1b**). Sousední dipóly formující souvislé oblasti jsou domény, nebo jinak, prostorově ohraničené oblasti s rozdílnými materiálovými vlastnostmi. Srovnaný systém dipólových momentů v doméně dává makroskopickou polarizaci (**obrázek 2.2a**).



Obrázek 2.2 – Polarizace piezoelektrické keramiky [5]

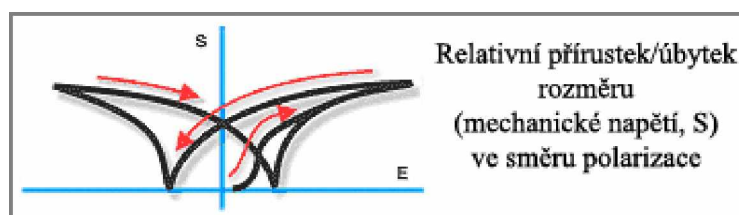
Celkové uspořádání domén v PZT keramice souvisí s výběrem možných dipólových momentů, které se srovnají co nejvíce se směrem elektrického pole (**obrázek 2.2b**). Během polarizace, elektrickým polem srovnané domény se rozšiřují na úkor domén, které nejsou dosud s polem uspořádané a PZT keramika se prodlouží ve směru elektrického pole. Když už elektrické pole nepůsobí, tak je PZT keramika stále polarizována (remanentní polarizace) a permanentně prodloužena (**obrázek 2.2c**).

Analogicky k charakteristikám feromagnetických materiálů, polarizovaný feroelektrický materiál vykazuje hysterezi. **Obrázek 2.3** ukazuje typickou hysterezní křivku vytvořenou použitím elektrického pole na PZT keramiku až k dosažení maximální polarizace P_S , snižováním intenzity pole k nule určujeme remanentní polarizaci P_R , reverzací připojeného pole dosáhneme záporné (maximální) polarizace a záporné remanentní polarizace a opětovou reverzací připojeného pole obnovujeme pozitivní remanentní polarizaci. Remanentní polarizace P_R pro složení v blízkosti MPB jsou typicky 20 až 30 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ a koercitivního pole E_C je kolem 0,5 až 1 kV/mm [1].



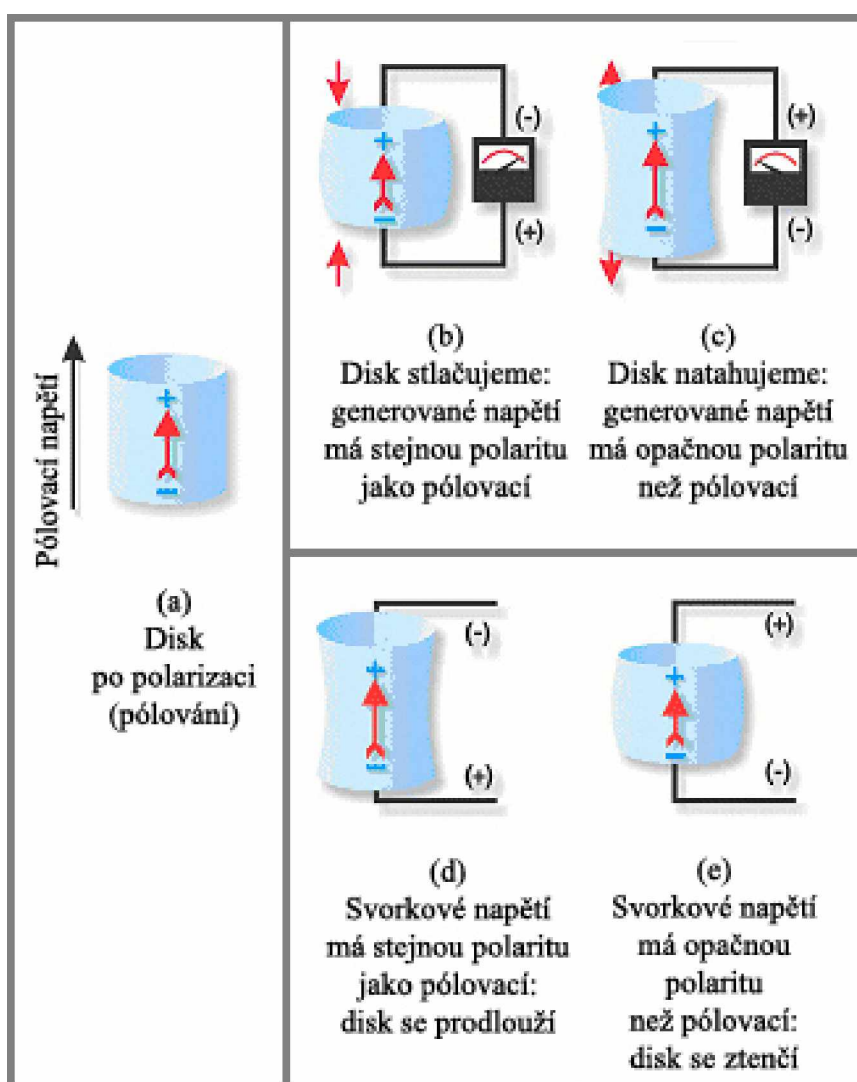
Obrázek 2.3 – Hysterezní křivka D - E , koercitivní pole E_C , remanentní polarizace P_R , spontánní polarizace P_S [1]

Náčrtek na **obrázku 2.4** obsahuje relativní změnu rozměru keramického elementu podél směru polarizace, odpovídající změnám elektrického pole. Relativní přírůstek nebo úbytek rozměru rovnoběžného se směrem elektrického pole je doprovázený odpovídajícím, ale přibližně o 50% menším relativním přírůstkem nebo úbytkem rozměru kolmého na elektrické pole.



Obrázek 2.4 - Účinek elektrického pole (E) po polarizaci (P) a odpovídající roztažení / kontrakce keramického elementu [5]

Na **obrázku 2.5** jsou znázorněny možné reakce PZT keramiky tyčového tvaru. Stlačováním keramiky podél směru polarizace nebo natahováním ve směru kolmém k polarizaci generuje elektrické napětí stejné polarity, jako pólovací elektrické napětí (**obrázek 2.5b**). Natahováním podél směru polarizace nebo stlačováním ve směru kolmém k polarizaci, generuje elektrické napětí s opačnou polaritou proti pólovacímu elektrickému napětí (**obrázek 2.5c**). Keramika přemění mechanickou energii stlačení nebo natažení na elektrickou energii, chová se jako generátor. Toto můžeme využít u akcelerometrů, silových snímačů, zapalovačů atd.



Obrázek 2.5 - PZT keramika jako generátor [b), c)] a motor [d), e)] [5]

Generované elektrické napětí vytvořené aplikováním mechanického namáhání je lineárně úměrné k limitujícímu mechanickému namáhání, které je specifické pro dané složení keramiky. Totéž platí pro generované mechanické namáhání. Jestliže je na

keramiku aplikováno ve směru pólovacího napětí elektrické napětí stejné polarity jako pólovací elektrické napětí, tak se keramika bude prodlužovat a jeho průměr se bude zmenšovat (**obrázek 2.5d**). Jestliže je aplikováno elektrické napětí opačné polarity než pólovací elektrické napětí, tak se keramika bude zmenšovat v tloušťce a její průměr se bude zvětšovat (**obrázek 2.5e**). Jestliže je aplikováno střídavé elektrické napětí, tak se bude element periodicky prodlužovat a zkracovat s frekvencí svorkového napětí [5]. Keramika převádí elektrickou energii na mechanickou, chová se jako motor a využíváme toho u piezoelektrických motorků, ve vstříkovacích čerpadlech, zařízeních generující zvuk nebo ultrazvuk atd.

2.1 Výroba PZT keramiky

Vyráběné PZT keramiky mají mnoho tvarů: disky, desky, tyčinky, válečky, trubičky, polokoule, fokusované čočky atd. Proces výroby začíná mletím oxidů (PbO , ZrO_2 , TiO_2) ve stechiometrickém poměru podle požadovaného chemického složení metodami práškové metalurgie v kulových mlýnech. Po promísení následuje tzv. kalcinace (za zvýšené teploty), při níž se uvolní ze surovin krystalová voda a proběhne chemická reakce. Dále přichází na řadu opětovné mletí na velikost zrn asi 1 až 10 μm a přidání organického pojiva. Nyní je surovina připravena pro formování keramických dílů metodou zvanou „green body“. Pomocí forem, extrudováním, „tape-castingem“ se vytváří požadované tvary. Pojivo se vypaluje při vysoké teplotě asi 1 200 až 1 300 $^{\circ}\text{C}$ a tím se dosahuje zvětšení hustoty a zmenšení velikosti pórů. Pak se případně PZT keramika strojově opracuje, běžnými metodami (broušení na plocho i na kulato, řezání, vrtání např. diamantovými nástroji). Po opracování následuje nanášení elektrod (napařováním Au, Pt nebo metodou zvanou „screen-plating“, spojenou s vypálením pro Ag-pastu). Makroskopické piezoelektrické vlastnosti se získávají polarizací v oleji (olej má větší elektrickou pevnost než vzduch) při zvýšené teplotě. Zbytky oleje z PZT keramiky jsou čištěny organickými rozpouštědly v ultrazvukových myčkách. Nakonec následuje testování materiálových vlastností keramických elementů podle požadavků zákazníka [1].

2.2 Měkké keramiky versus tvrdé keramiky

Chemické složení PZT keramiky se modifikuje malým množstvím dopujících přísad, čímž lze významně ovlivňovat materiálové vlastnosti. Problém vzniká u některých konkurenčních vlastností (např. většímu piezoelektrickému koeficientu d_{33} zpravidla odpovídá větší permitivita ϵ_{33}). V **tabulce 2.1** vidíme srovnání základních vlastností, koeficientů tvrdých a měkkých keramik.

Měkké (soft) keramiky se vyznačují velkým koeficientem elektromechanické vazby, velkou piezoelektrickou konstantou, vysokou permitivitou, velkou dielektrickou konstantou, vysokými dielektrickými ztrátami, malým mechanickým koeficientem jakosti a špatnou linearitou. Měkké keramiky produkují větší posunutí a širší signální šířku pásma, ale ty zase vykazují větší hysterezní křivku a jsou více náchylné na depolarizaci a další rušivé vlivy. Měkké keramiky pracují při nižších teplotách, pod Curieovou teplotou a jsou tedy využívány v aplikacích s nižším teplotním zatížením. Měkké keramiky nemohou být v aplikacích vyžadující kombinaci vysokofrekvenčních vstupů a silných elektrických polí, proto měkké keramiky využíváme v první řadě v senzorických aplikacích, jako snímače [3].

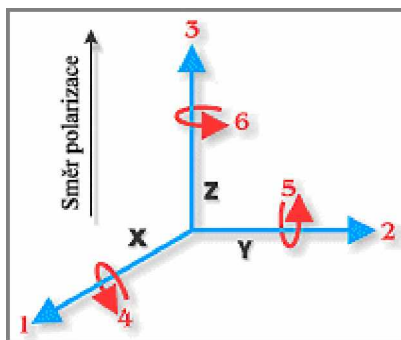
Tvrdé (hard) keramiky mají malý piezoelektrický nábojový koeficient, velký koeficient elektromechanické vazby a velký mechanický koeficient jakosti. Těžko se dají polarizovat nebo depolarizovat. Ačkoli tvrdé keramiky obecně jsou více stabilní než měkké, tak nedosahují takových posunutí jako měkké. Tvrdé keramiky jsou aplikované v prostředí s vysokým mechanickým zatížením a elektrickým napětím.

Koeficienty (konstanty)	Měkké keramiky	Tvrdé keramiky
Piezoelektrická konstanta	velká	malá
Permitivita (ϵ)	velká	malá
Dielektrická konstanta (K^T)	velká	malá
Dielektrické ztráty ($\tan\delta$)	velké	malé
Koeficient elektromechanické vazby (k)	velký	malý
Elektrický odpor	velký	malý
Mechanický koeficient jakosti (Q_m)	malý	velký
Koercitivní elektrické pole (E_C)	malé	velké
Linearita	špatná	dobrá
Polarizace / Depolarizace	lehká	obtížná

Tabulka 2.1 - Srovnání charakteristických rysů měkkých a tvrdých PZT keramik [3]

2.3 Koeficienty piezoelektrických materiálů

Libovolnou piezoelektrickou keramiku lze před polarizací považovat za izotropní materiál, po polarizaci má polární symetrii nekonečno mm. Materiálové koeficienty elektromechanických vlastností (elastické s , piezoelektrické d a dielektrické ϵ) jsou anizotropní, tj. mají různé hodnoty v různých směrech vzhledem ke směru polarizace [1].



Obrázek 2.6 - Souřadný systém a směr pozitivní polarizace [5]

Směr pozitivní polarizace je obvykle shodný s osou 3, Z (**obrázek 2.6**). Směr os X, Y nebo Z je reprezentován indexy 1, 2, 3 a směr řezu těchto os je reprezentován indexy 4, 5 nebo 6. Materiálové koeficienty elektromechanických vlastností mají obecně dva dolní indexy, které mohou nabývat hodnot 1 až 6. Např. pro elastický a dielektrický koeficient nabývají oba indexy hodnot 1 až 6, pro piezoelektrický koeficient je první index 1 až 3 a druhý 1 až 6. Tensorové složky materiálových koeficientů lze zapsat v maticovém tvaru:

elastický koeficient:

$$\begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{13} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66} \end{pmatrix}$$

$$s_{66} = \frac{1}{2}(s_{11} - s_{12})$$

piezoelektrický koeficient:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

koeficient permitivity:

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{pmatrix}$$

Vztahy mezi mechanickým napětím $T_{\lambda\mu}$, elektrickým polem E_i , mechanickou deformací S_λ a indukcí elektrického pole D_i dávají stavové rovnice:

$$S_\lambda = s_{\lambda\mu}^E \cdot T_\mu + d_{i\lambda} \cdot E_i \quad (2.1)$$

$$D_i = d_{i\mu} \cdot T_\mu + \epsilon_{ij}^T \cdot E_j \quad (2.2)$$

2.3.1 Piezoelektrický nábojový koeficient

Piezoelektrický nábojový koeficient $d_{i\lambda}$ je polarizace vygenerovaná na jednotku mechanického namáhání (T_λ) aplikovaného na piezoelektrický materiál, nebo jinak, je mechanická deformace (S_λ) vygenerovaná piezoelektrickým materiálem na jednotku použitého elektrického pole. Deformace indukovaná v piezoelektrickém materiálu po aplikaci elektrického pole je produktem hodnoty elektrického pole, proto $d_{i\lambda}$ je důležitý indikátor vhodnosti materiálu pro deformačně závislé aplikace (aktuátory).

2.3.2 Permittivita

Permittivita, nebo také dielektrická konstanta ϵ je pro piezoelektrický keramický materiál posuvný proud na jednotku elektrického pole. ϵ^T je permitivita při konstantním mechanickém namáhání. První dolní index ukazuje směr posuvného proudu; druhý směr elektrického pole.

Relativní permitivita K^T vztažená k ϵ_0 , kde $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m, můžeme vyjádřit rovnicí:

$$K^T = \epsilon^T / \epsilon_0 \quad (2.3)$$

2.3.3 Elastická konstanta

Elastická konstanta $s_{\lambda\mu}^E$ je deformace generovaná piezoelektrickým materiálem na jednotku aplikovaného mechanického napětí. První dolní index ukazuje směr, ve kterém se piezoelektrický element deformuje; druhý index značí směr mechanického napětí. s^D je elastická konstanta při konstantní indukci elektrického pole; s^E je elastická konstanta při konstantním elektrickém poli.

2.3.4 Koeficient elektromechanické vazby

Koeficient elektromechanické vazby k je ukazatel účinnosti, se kterou piezoelektrický materiál přemění elektrickou energii na mechanickou nebo mechanickou na elektrickou. První dolní index značí směr, ve kterém je aplikováno elektrické pole; druhý značí směr, ve kterém je aplikována nebo vyvolána mechanická energie (kmity). Hodnota přeměněné energie závisí na druhu keramiky a směrech aplikovaných sil. Koeficient elektromechanické vazby k nezahrnuje dielektrické ztráty a mechanické ztráty. Přesná míra efektivity je podíl přeměněné, použitelné energie dodané piezoelektrickým elementem a celkové energie spotřebované elementem [5].

Pro tenký disk piezoelektrické keramiky se používá planárního koeficientu elektromechanické vazby k_p , který vyjadřuje vazbu mezi elektrickým polem rovnoběžným se směrem, ve kterém je keramický element polarizován (směr osy 3) a mechanickou deformací, která generuje radiální kmity ve směru osy 1 a 2.

Pro disk nebo destičku s velkými příčnými (planárními) rozměry (vztaženo k tloušťce) se používá tloušťkový koeficient k_t , který vyjadřuje vazbu mezi elektrickým polem ve směru 3 a kmity ve stejném směru. Rezonanční frekvence v tloušťce elementu (tloušťkově rozpínané kmity) nějakého tvaru je mnohem vyšší, než rezonanční frekvence elementu v příčném rozměru (planární-obrysové kmity).

Koeficient elektromechanické vazby k_{33} je koeficient pro destičky polarizované ve směru délky, vyjadřuje vazbu mezi elektrickým polem ve směru osy 3 (paralelně ke směru, ve kterém je keramický element polarizován – směr osy 3) a kmity ve směru osy 3.

Koeficient elektromechanické vazby k_{31} je koeficient pro destičky polarizované ve směru tloušťky, vyjadřuje vazbu mezi elektrickým polem ve směru osy 3 (paralelně

ke směru, ve kterém je keramický element polarizován – směr osy 3) a kmity ve směru osy 1 (kolmo ke směru, ve kterém je keramický element polarizován – směr osy 3)

Koeficient elektromechanické vazby k_{15} vyjadřuje vazbu mezi elektrickým polem ve směru osy 1 a smykovými kmity v rovině 1,3.

2.3.5 Koeficient dielektrických ztrát

Koeficient dielektrických ztrát $tg\delta$ je tangenta „ztrátového“ úhlu. $tg\delta$ delta je určen poměrem efektivní konduktance a susceptance. $tg\delta$ můžeme vypočítat z poměru imaginární a reálné části permitivity. Hodnoty $tg\delta$ jsou různé, pro hard keramiky typicky kolem 0,1 % a pro soft keramiky kolem 1 %.

$$\varepsilon = \varepsilon' - j \cdot \varepsilon'' \quad (2.4)$$

$$tg\delta = -\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (2.5)$$

2.3.6 Rezonanční a antirezonanční frekvence

Piezoelektrický keramický element vystavený střídavému elektrickému poli mění periodicky rozměry, v závislosti na frekvenci připojeného elektrického pole. Frekvence, při níž je odezva kmitů elementu na elektrickou vstupní energii nejrychlejší a zároveň je s největší efektivitou přeměněna tato energie na mechanickou, se nazývá rezonanční frekvence f_r . Zvyšováním frekvence, kmity elementu oscilují k frekvenci (f_r), při které je impedance minimální (maximální admitance). Rezonanční frekvence je závislá na složení keramického materiálu, tvaru a celkovém objemu elementu. Když frekvenci dále zvyšujeme, impedance stoupá na maximum (minimální admitance). Tuto frekvenci nazýváme antirezonanční frekvencí f_a . Tyto frekvence jsou určeny experimentálně a ukazují na chování piezoelektrické keramiky.

Hodnoty frekvencí při minimální a maximální impedanci mohou být užity pro výpočet koeficientu elektromechanické vazby k , jako indikátoru účinnosti, se kterou piezoelektrický materiál přemění elektrickou energii na mechanickou nebo naopak. Koeficient elektromechanické vazby k závisí na způsobu kmitání a tvaru keramického elementu. Efektivitu přeměny energie ovlivňují dielektrické a mechanické ztráty, ale dielektrické ztráty jsou pro efektivitu přenosu více významné [5].

2.4 Stabilita PZT materiálu

Většina vlastností piezoelektrického keramického elementu po polarizaci degraduje logaritmicky s časem. Přesná rychlost degradace vlastností závisí na složení keramického elementu a výrobním postupu užitého při jeho přípravě. Nesprávné zacházení s PZT keramikou, překročení elektrických, mechanických nebo tepelných omezení může urychlit tento proces.

Vystavení silnému elektrickému poli opačné polarity, než je polarizující pole, vede k depolarizaci piezoelektrického materiálu. Míra polarizace závisí na jakosti materiálu, době vystavení elektrickému poli, teplotě a dalších vlivech. Překročením mechanických napětíových omezení narušuje orientaci domén v piezoelektrickém materiálu, která může narušit uspořádání dipólů. Choulostivost materiálu na elektrickou depolarizaci a schopnost odolat mechanickému namáhání se liší různorodostí piezoelektrických materiálů.

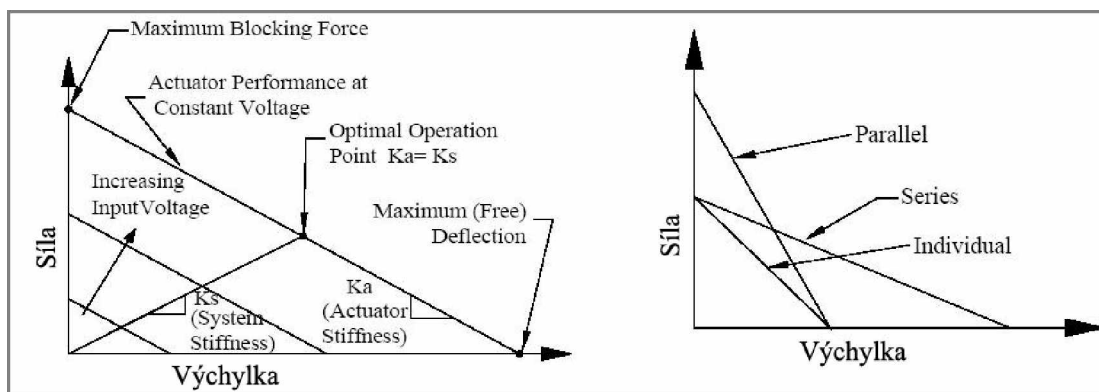
Když zahřejeme piezoelektrický keramický materiál na jeho Curieovu teplotu, domény budou neuspořádané a materiál se depolarizuje. Doporučená horní provozní teplota pro keramiku obvykle přibližně uprostřed rozmezí mezi 0 °C a Curieovou teplotou [5].

3 Úvod do aktuátorů

Hlavní oblastí výzkumu aktuátorů je struktura, která může generovat vysoké posunutí a sílu v celém frekvenčním spektru, za stálého působení silných elektrických polí bez depolarizačního účinku (pro piezoelektrické aktuátory). Využití aktuátoru vyplývá z jeho vysoké mechanické koncentrace energie; nicméně, všechny aktuátory mají obecně aspoň jeden nedostatek závisející na mechanickém prodloužení, síle nebo frekvenční způsobilosti. Historicky primární omezení k rozšířenému použití těchto aktuátorů byla rychlost odezvy a jejich okamžitá výchylka.

Hlavní parametry, které charakterizují nějaký lineární aktuátor jsou výchylka, síla, frekvence, rozměry, hmotnost a velikost vstupní elektrické energie. U většiny aktuátorů jsou zmiňované parametry různé. Např. hydraulický aktuátor má vynikající schopnost vyvinutí velké síly a posunutí, ale jen v pásmu nízkých frekvencí. Slitinové aktuátory s tvarovou pamětí jsou podobné v tom, že mohou generovat velká posunutí a sílu, ale jejich budící (actuating) frekvence je extrémně špatná. Elektromagnetické aktuátory mají dobrý operační frekvenční rozsah. Lineární indukční aktuátory generují

velkou sílu a prodlužení; nicméně, jsou obecně těžké a vyžadují hodně silná elektrická pole. Piezoelektrické aktuátory disponují vynikající provozní šířkou frekvenčního pásma a generují poměrně velké síly v kompaktní velikosti, ale na druhou stranu dosahují velmi malých posunutí (výchylek).



Obrázek 3.1 - Síla a výchylka, typické parametry piezoelektrických aktuátorů [2]

Aktuátory z „chytrých“ materiálů (PZT) jsou schopny přijmout 100 až 1000krát větší mechanickou energii na jednotku objemu (energetická změna) a nahromadit 10krát více energie než konvenční aktuátory (elektromagnetické, hydraulické nebo pneumatické). Chytré materiálové aktuátory jsou testované pro použití v různorodých oblastech, včetně aeroelastické ochrany proti vibracím, aktivní akustické kontroly, tvarové kontroly povrchu, kontroly průtoku tekutin a v mnoha jiných aplikacích. Aktuátory z „chytrých“ materiálů jsou využívány hlavně díky velkému operačnímu frekvenčnímu rozsahu.

Pro většinu piezoelektrických aktuátorů bylo ohnisko výzkumu pokus o zesílení výchylky a vytvoření užitečného designu pro různorodé aplikace. Aktuátory využívající externí mechanický člen, resp. jeho budící schopnost jsou: „flexure-hinged“, Moonie, Cymbal, bimorfnní dvoj-zesilovač, flextensional, hydraulický, pyramida a X-rám aktuátor. Frekvenčně využívané aktuátory se spoléhají na střídavý řídicí signál generující pohyb. Tyto aktuátory obsahují krokové a ultrazvukové (lineární a rotační) motory. „Stacky, bendery“, RAINBOW, C-bloky, Crescent, tenké vrstvy složené z unimorfnního feroelektrického budícího obvodu a senzoru (THUNDER), teleskopické a „zpětnoohybné“ aktuátory patří mezi aktuátory nevyužívající externí mechanismus.

Piezoelektrický aktuátor může být charakterizován zatěžovací křivkou znázorněnou na **obrázku 3.1**. Pro většinu aplikací může být považován silový výstup a

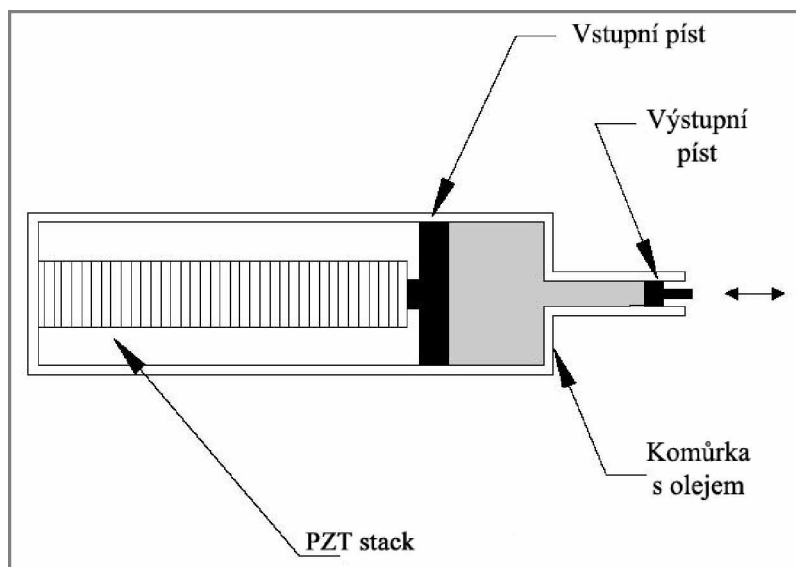
výstupní výchylka aktuátoru při daném svorkovém napětí za lineární. Oblast pod křivkou reprezentuje práci vykonanou aktuátorem [2].

Přenos energie z aktuátoru k mechanickému systému je maximální, když tuhost aktuátoru a mechanického systému jsou srovnatelné. Výchylka aktuátoru je pro dané svorkové napětí s rostoucím zatížením redukována; výchylka roste, pokud není aktuátor zatížen. Blokovací síla je síla, kterou aktuátor vyvine, působí-li protisíla tak, aby nedošlo k žádnému posunutí.

3.1 Externí mechanismy s multi-stack aktuátory

3.1.1 Aktuátor s hydraulickým mechanismem

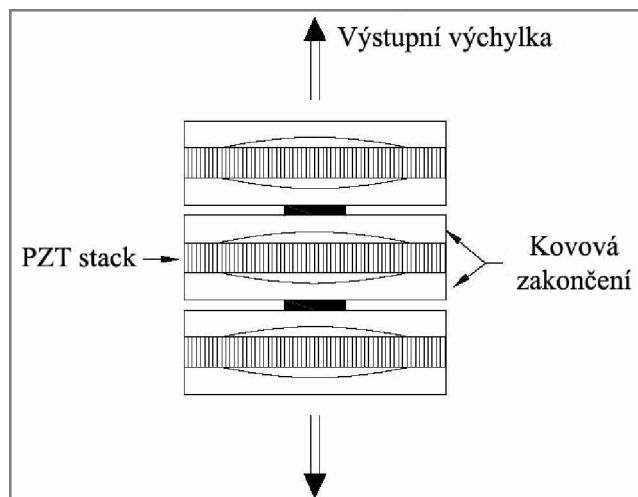
Použitím hydraulického zařízení dosáhneme zlepšení odezvy na výchylku piezoelektrického aktuátoru. Typický piezoelektrický hydraulický zesilovač se skládá z PZT stacku, vstupního a výstupního pístu a nějakého typu hydraulické tekutiny (**obrázek 3.2**). Převodový poměr může dosáhnout u hydraulických zesilovačů až 100 [2].



Obrázek 3.2 - Typický hydraulický zesilující mechanismus [2]

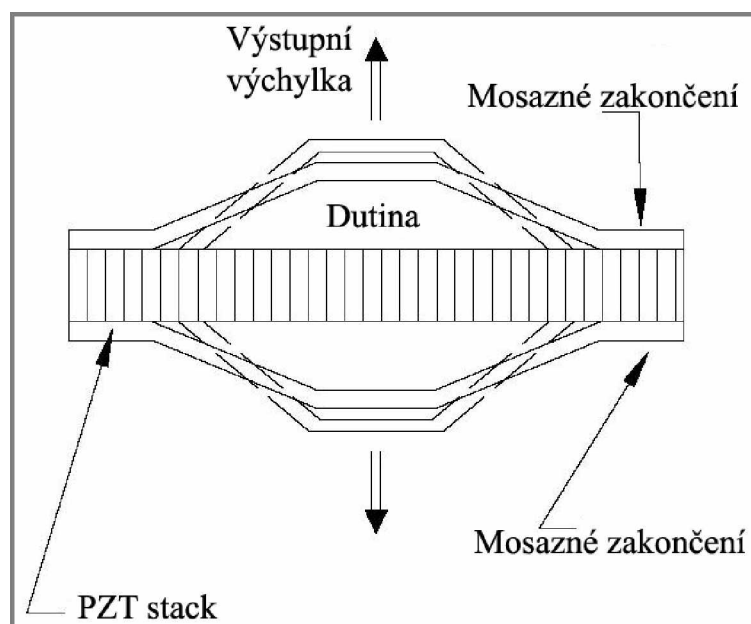
3.1.2 Pružné (flextensional) aktuátory

Pružné aktuátory využívají PZT stacky a zesilující mechanismus přeměňující pohyb vygenerovaný PZT stackem na využitelný výstupní pohyb v příčném směru. Pružná zařízení byla vyvinuta koncem roku 1960 („Flexural-Extensional“) a v první řadě používány v akustických aplikacích.



Obrázek 3.3 - Tři Moonie aktuátory, navrstvené a sériově zapojené [2]

Jeden pružný aktuátor tohoto typu je nazvaný Moonie. Tyto aktuátorové sendviče PZT stacků mají mezi dvěma konci mělké dutinky. Výchylka PZT stack ohýbá tak, že vzniklá čepička produkuje zvětšenou výchylku. Výchylka výstupu aktuátoru se zvyšuje s průměrem dutiny a hloubkou (**obrázek 3.3**).

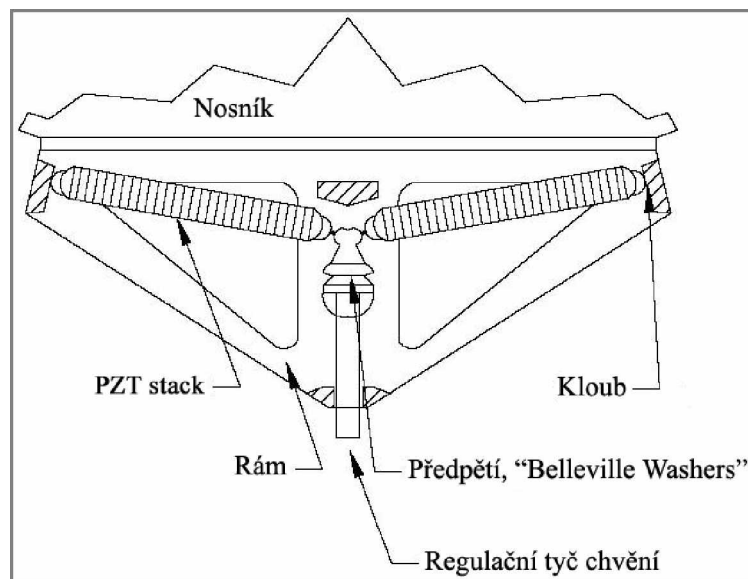


Obrázek 3.4 - Aktuátor Cymbal v původním a deformovaném stavu [2]

V činnosti podobný aktuátor k Moonie je aktuátor Cymbal, který se skládá z PZT stacku, který generuje kombinaci ohybového a rotačního pohybu (**obrázek 3.4**). Přednost tohoto aktuátoru před Moonie je to, že výchylka může být zesílena 2krát, zatímco silový výstup je zesílen 5krát [2].

3.1.3 Kinematický mechanismus

Neustále se vyvíjí nové metody používání kinematických článků ke zvětšení výstupní výchylky piezoelektrických materiálů. Např. byl vyvinut kinematický mechanismus dávající maximální sílu 1 N s prodloužením 1 mm. Tento design (**obrázek 3.5**) nahrazuje nelinearitu PZT stacků a dosahuje téměř konstantní síly během pohybu aktuátoru. Tento zesilovací mechanismus obsahuje pyramidový aktuátor, X-rám aktuátor nebo dvojitý X-rám aktuátor [2].

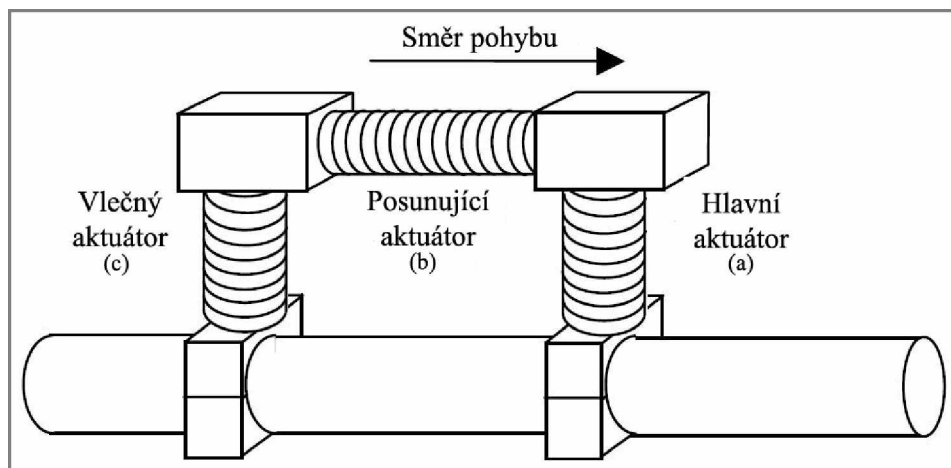


Obrázek 3.5 - Schéma pyramidového aktuátoru [2]

3.2 Aktuátory využívající vlivu frekvence

V této kategorii se využívá zvětšené deformace výstupu aktuátoru použitím frekvenčního parametru PZT materiálu pro rychle pohybující se aktuátor v jednom směru, v sérii malých kroků. Tento typ architektury dosahuje nekonečného prodloužení, omezeného pouze délkou aktuátoru.

První typ aktuátoru operující s frekvencí, byl vyvinutý v roce 1970 a je známý jako „píd'alka“. Píd'alka se skládá z tří společně spojených aktuátorů, které v sekvencích posouvají celý aktuátor po rameni (**obrázek 3.6**). Nejprve se hlavní aktuátor (**obrázek 3.6a**) uvolní z upnutí na rameni, posunující aktuátor (**obrázek 3.6b**) se prodlouží a hlavní aktuátor sevře rameno. Dále koncový vlečný aktuátor (**obrázek 3.6c**) uvolní upnutí, posunující aktuátor uvolní kontakty a vlečný aktuátor sevře upnutí ramena, teď je v posunuté pozici, která je rovna prvnímu kroku v celkové sekvenci kroků.



Obrázek 3.6 - Frekvenční-pákový pidiaktuátor [2]

Frekvenční aktuátor s pákovým převodem byl užíván v aplikacích jako: vyrovnání vláknových optických součástí, tvarová kontrola na křídlech a polohování drátového obrábění.

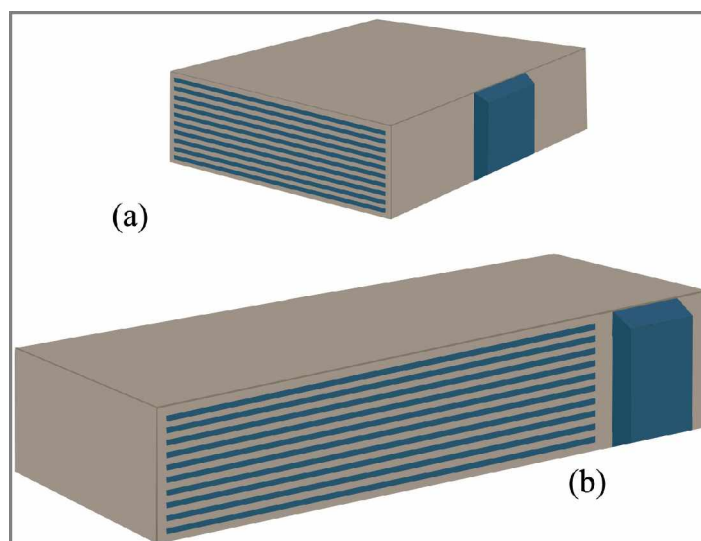
V roce 1996 bylo vytvořeno další zařízení podobné pídálce, odlišující se pouze obsahem malých zoubků na upnutí ramene, takže došlo ke zvýšení výstupní síly. Později, během roku 1996 bylo vytvořeno zařízení nazvané „housenka“, které obsahuje větší množství spojených aktuátorů. Dále bylo také testováno použití piezoelektrických bimorfních aktuátorů s válcovým klínovým zařízením zlepšující výstupní výkon aktuátoru, ve srovnání s tradiční pídálkou [2].

3.3 Multi-layer aktuátory

Axiální nebo příčný multi-layer aktuátor (**obrázek 3.7**) je zkonstruován z více vrstev s tloušťkou, která musí být podstatně menší než 1 mm. Po dosažení této tloušťky, multi-layer aktuátor využívá nižší elektrická napětí. Celá struktura z PZT keramiky a elektrod musí být zpevněna do jednoho celku (spékání, „co-firing“). Kvůli vyššímu piezoelektrického koeficientu se využívají soft PZT keramiky. Jejich nevýhoda je však zpravidla vyšší kapacita, menší Curieova teplota a větší hystereze než mají hard PZT keramiky. Proto komerčně vyráběné spěkané multi-layer aktuátory nemohou být používány při teplotách nad 220°C, ani nejsou slučitelné s vysokými elektrickými proudy.

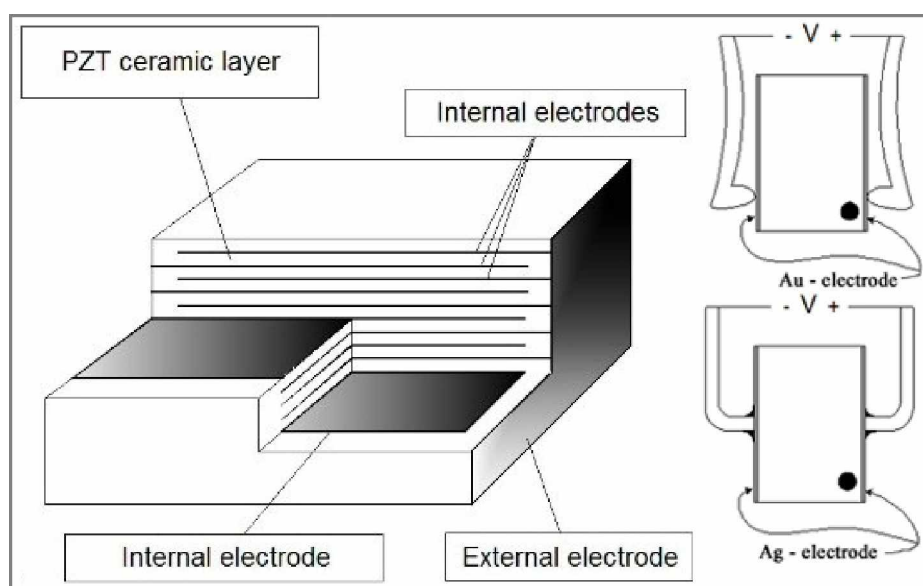
Posunutí na jednotku výšky nebo délky keramiky v designu multi-layer je ekvivalentní konvenčním aktuátorům s navrstvenými PZT elementy (multi-stackům).

Multi-layer aktuátory dosahují vzhledem k multi-stackům stejného pohybu, ale při mnohem nižším elektrickém napětí.



Obrázek 3.7 – Axiální (a) a příčný (b) multi-layer aktuátor [3]

50 V vstupního elektrického napětí může poskytnout elektrické pole přibližně 1 kV/mm [3]. Navzdory této výhodě, elektrické napětí generuje např. v 1000 vrstvách o tloušťce 50 μm zvýšení tloušťky aktuátoru jen o několik málo μm . Tak se získá prodloužení použitelné v aplikacích. Pro větší posuny je nezbytné použít několik seriově zapojených multi-layer axiálních aktuátorů. Na **obrázku 3.8** můžeme vidět vnitřní strukturu multi-layer aktuátoru.

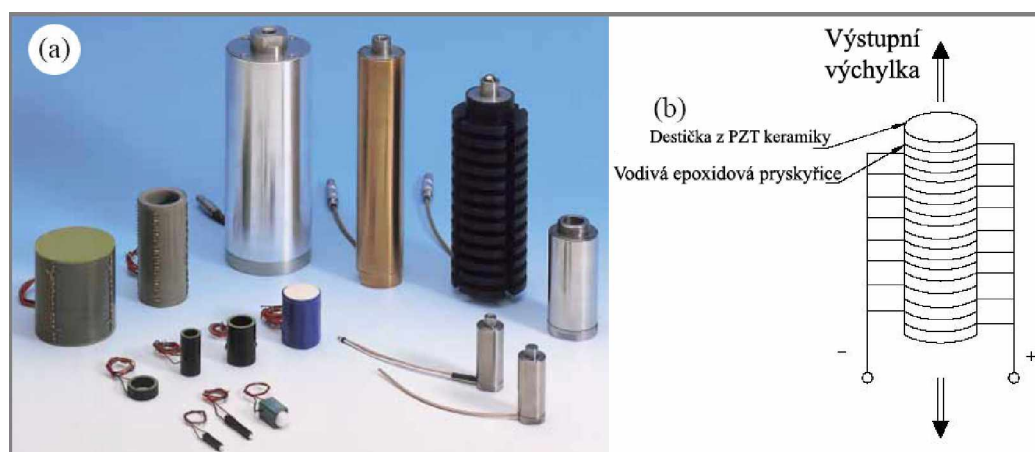


Obrázek 3.8 – Vnitřní struktura multi-layer aktuátoru a napájené Au, Ag elektrody [7]

3.4 Multi-stack aktuátory

Multi-stack aktuátory patří mezi velmi rozšířený design axiálních aktuátorů skládající se z navrstvené PZT keramiky (**obrázek 3.9**). Aplikace, ve kterých dodnes multi-stacky našly uplatnění zahrnují kontrolu v mikroposuvech, u vstřikování paliva a bubnovém ovládání brzd.

Aktuátory a některé jejich požadované vlastnosti jsou konkurenční, tzn., že jedna vlastnost se změní na úkor druhé (např. ohybový aktuátor s maximalizovaným pohybem, na úkor většího pohybu obětuje velikost produkované síly). Výběr vhodného aktuátoru závisí na druhu aplikace, na žádoucích charakteristických vlastnostech nejdůležitějších pro aplikaci, s uvažováním rušivých vlivů, které by mohly narušit správnou činnost aktuátoru.

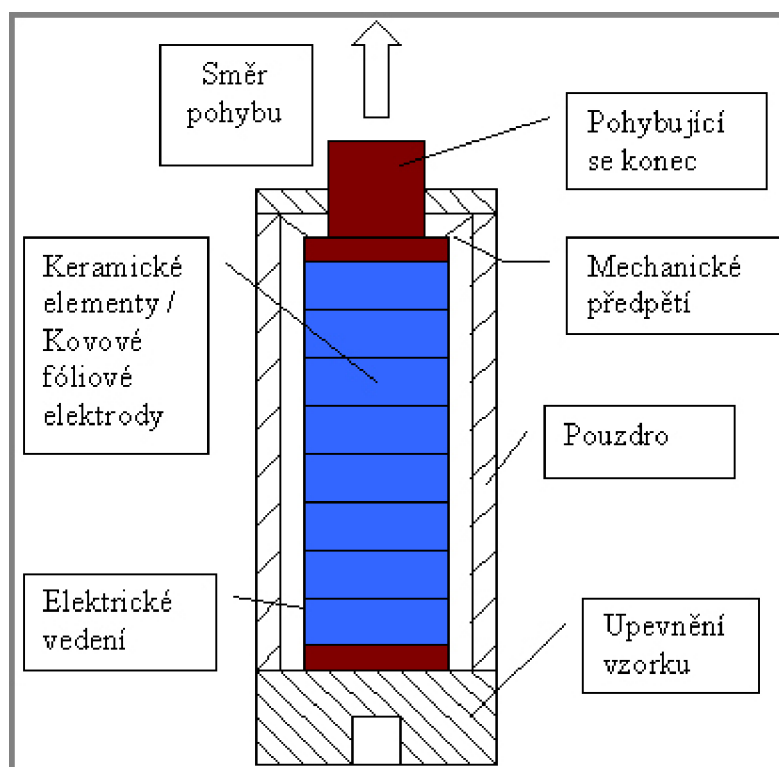


Obrázek 3.9 - (a) PZT multi-stacky [5], (b) Schéma zapojení PZT multi-stacku [2]

Abychom dosáhli použitelného prodloužení (výchylky) jednoho PZT elementu je zapotřebí velmi vysokého napětí (typicky kV), proto využíváme složených nebo navrstvených multi-stack axiálních aktuátorů. Multi-stack se skládá z více navrstvených keramických elementů (**obrázek 3.10**). Směry polarizací jednotlivých destiček jdou proti sobě (tzn., 1. destička se směrem polarizace dolů, 2. nahoru atd.).

Při výrobě multi-stacků využíváme navrstvování („discrete stacking“). Nejdříve je PZT elementy individuálně zformovány, spečeny a polarizovány. Připevní se elektrody a celek z keramiky, elektrod se společně navrství, střídavě s vrstvami tenké kovové fólie skrze místa, kde je elektrický kontakt. Navrstvování nabízí flexibilitu v designu tvaru keramických elementů a širokou řadu keramických materiálů poddajných těmto metodám zpracování. Navrstvování zabezpečuje lepší kontrolu tepla

generovaného aktuátorem během frekvenčního procesu. Naopak nás omezuje tloušťka PZT keramiky, z které je multi-stack zkonstruován. Proto elektrické napětí potřebné pro správnou činnost navrstveného aktuátoru a pro maximalizování výchylky jednotlivých elementů aktuátoru je stále ještě vysoké, třebaže je menší než kV. Je zapotřebí 500-1000 V vstupního elektrického napětí pro správnou činnost multi-stacku. Tyto aktuátory jsou často nazývané vysokonapěťovými nebo dynamickými aktuátory.



Obrázek 3.10 – Komerční design multi-stack axiálního aktuátoru [3]

Prodloužení multi-stacku je úměrné výšce aktuátoru. V závislosti na použité PZT keramice pro konstrukci multi-stacku, se maximální deformace (prodloužení / výška multi-stacku) může rovnat 0,15 až 0,2 % výšky multi-stacku. Pro vyšší aktuátory není zapotřebí velké elektrické napětí, ale zase dochází ke zvýšení kapacitní reaktance. Multi-stack musí generovat prodloužení proti proměnné síle - zdroji, upnutí, hmotnému zatížení, nebo když je používán pro generování kmitů; proto se reakce aktuátoru bude měnit a záviset na vztahu mezi aplikovanou silou a tuhostí aktuátoru.

Užitečné vlastnosti multi-stacků můžeme stanovit z charakteristik PZT keramiky, způsobu, kterým je multi-stack zkonstruován (navrstvování, spékání pro design multi-layer), z výšky a plochy příčného řezu multi-stacku. Multi-stack z PZT

keramiky může být pokrytý izolační vrstvou pro ochranu před mechanickým poškozením, vlhkostí atd. Začleněním mechanického předpětí, tzn., multi-stacky mohou být v pouzdře z nerezové oceli nebo jiném (syntetickém) obalu. Předpětí je nezbytnou součástí aktuátoru určeného pro dynamické operace (např. pro kompenzaci velkých tahových sil).

Při konstrukci navrstveného axiálního aktuátoru musíme podstoupit několik dalších kompromisů. Konstrukce multi-stacku může významně redukovat tuhost celého systému. Požadovaná tuhost aktuátoru může být realizována zařazením mechanického předpětí, typicky přes spodní upevnění celku nebo centrální šroub. PZT keramika má malou pevnost v tahu, proto složený aktuátor, který nemá začleněn předpětí (pouzdro), musí být chráněn proti tažným silám jiným způsobem.

Tuhost závisí na upevnění celého multi-stacku a jakékoli zatížení redukuje výkon aktuátoru. Velké mechanické předpětí může vést k částečné depolarizaci PZT elementů. Slepění PZT elementů odstraňujeme stinné stránky předpětí multi-stacku, vrstvy spojené pojivem (epoxidovým lepidlem) dělají multi-stack elastičtější, ale opět náchylným na namáhání v tahu.

Prodloužení nemůže být jediná uvažovaná vlastnost při konstrukci nebo vybírání multi-stacku. Výběr vhodné PZT keramiky pro aplikaci zahrnuje stanovení rovnováhy elektromechanických vlastností, příkonu, množství vygenerovaného tepla a provozní teploty. U aktuátoru určeného pro vysokofrekvenční procesy by mohly hysterezní ztráty v PZT keramice nepřipustně ohřívat celý aktuátor a muselo by dojít ke kompenzaci (např. zpětnovazební regulační systém). Také vnější rušivé rezonance (pod rezonanční frekvencí) pouzdra by mohly představovat problém. Abychom se vyhnuli těmto komplikacím, tak by měl být systém udělán co nejvíce kompaktní [3].

3.5 Multi-stack pseudo-střižné aktuátory

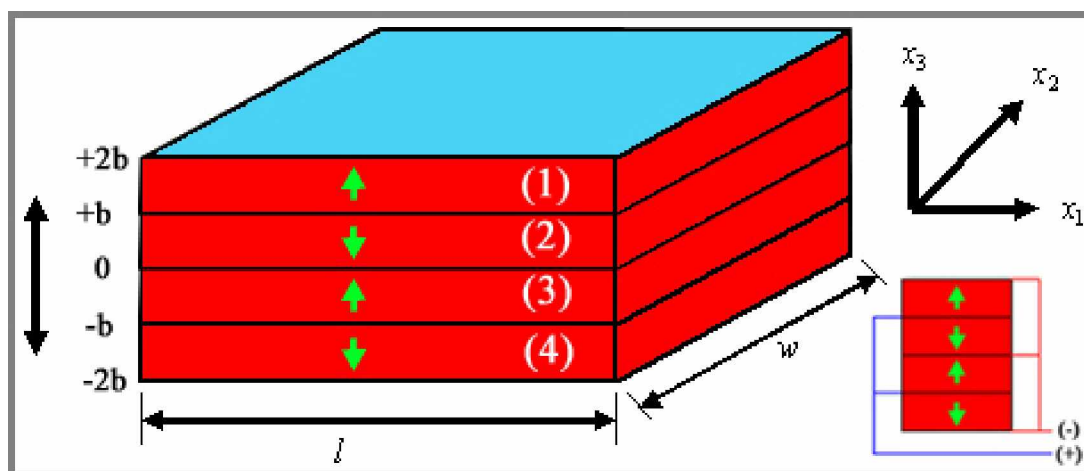
Multi-stack pseudo-střižný aktuátor se skládá z navrstvených, ve stejném směru tloušťkově polarizovaných destiček z PZT keramiky. Destičky jsou slepeny pomocí pevné vodivé epoxidové pryskyřice, s jedním pevně zafixovaným koncem. Pro stabilitu je mezera mezi destičkami vyplněna tenkou plastickou fólií.

Když bylo aplikováno na spodní destičku elektrické pole proti směru polarizace, destičky byly střídavě vystavovány zápornému / kladnému elektrickému poli,

prodlužovaly se nebo zkracovaly, ale celé posunutí bylo ve stejném směru. Výsledkem toho aktuátor vykazuje silný střížný pohyb okolo kolmice ke směru slepení. Jestliže je elektrické napětí spodní destičky obrácené, směr posunutí je také obrácený.

Bylo dosaženo více než 50 μm posunutí aktuátoru složeného z osmnácti PZT elementů, s rozměrem jednoho elementu (25,57 x 4,05 x 0,51) mm. Zařízení tohoto typu by mohla nahradit v mnoha aplikacích konvenční axiální aktuátory, jako snímače a regulátory průtoku, čerpadlové systémy atd [3].

4 Tloušťkově rozpínavé kmity multi-stack aktuátorů



Obrázek 4.1 – Schéma čtyř navrstvených obdélníkových PZT elementů [4]

Předpoklady:

- počátek souřadnicového systému je mezi druhou a třetí destičkou
- PZT keramika, krystalografická symetrie
- tloušťka destičky je mnohokrát menší než délka a šířka destičky ($b \ll l, w$)

Stavové rovnice:

$$T_{\mu} = c_{\mu\nu}^E \cdot S_{\nu} - e_{k\mu} \cdot E_k \quad (4.1)$$

$$D_i = e_{i\nu} \cdot S_{\nu} + \epsilon_{ik}^S \cdot E_k \quad (4.2)$$

kde $E_k = -\frac{\partial \Phi}{\partial x_k}$ je intenzita elektrického pole, $S_{ij} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ mechanická

deformace, D_i indukce elektrického pole a T_{μ} mechanické napětí.

Pohybová rovnice pro element kontinua:

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} + f_i = \rho \cdot \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (4.3)$$

kde f_i je objemová síla.

Maxwellova rovnice:

$$\frac{\partial D_i}{\partial x_i} = \rho_{free} \quad (4.4)$$

kde ρ_{free} je hustota volných nábojů.

V prostoru bez volných nábojů a bez objemových sil je $f_i = 0, \rho_{free} = 0$.

Okrajové podmínky:

1) při $x_3 = +2 \cdot b$, nulové namáhání kolmo na plochu destičky, tzn. $T_3^{(1)} = 0$

$$\text{při } x_3 = +b \quad T_3^{(1)} = T_3^{(2)}, \quad u_3^{(1)} = u_3^{(2)}$$

$$\text{při } x_3 = 0 \quad T_3^{(2)} = T_3^{(3)}, \quad u_3^{(2)} = u_3^{(3)}$$

$$\text{při } x_3 = -b \quad T_3^{(3)} = T_3^{(4)}, \quad u_3^{(3)} = u_3^{(4)}$$

při $x_3 = -2 \cdot b$, nulové namáhání kolmo na plochu destičky, tzn. $T_3^{(4)} = 0$

2) intenzita elektrického pole je $E_1^{(q)} = E_2^{(q)} = 0, E_3^{(q)} \neq 0$, kde $q = (1 \text{ až } 4)$,

a indexy $^{(1)}, ^{(2)}, ^{(3)}$ a $^{(4)}$ značí při výpočtu uvažovaný PZT element.

Stavové rovnice:

mechanické napětí na destičkách

$$T_3^{(1)} = c_{33}^D \cdot \frac{\partial u_3^{(1)}}{\partial x_3} - e_{33} \cdot E_3^{(1)},$$

$$T_3^{(2)} = c_{33}^D \cdot \frac{\partial u_3^{(2)}}{\partial x_3} + e_{33} \cdot E_3^{(2)},$$

$$T_3^{(3)} = c_{33}^D \cdot \frac{\partial u_3^{(3)}}{\partial x_3} - e_{33} \cdot E_3^{(3)},$$

$$T_3^{(4)} = c_{33}^D \cdot \frac{\partial u_3^{(4)}}{\partial x_3} + e_{33} \cdot E_3^{(4)}$$

indukce elektrického pole

$$D_3^{(1)} = e_{33} \cdot \frac{\partial u_3^{(1)}}{\partial x_3} + \epsilon_{33}^S \cdot E_3^{(1)},$$

$$D_3^{(2)} = -e_{33} \cdot \frac{\partial u_3^{(2)}}{\partial x_3} + \epsilon_{33}^S \cdot E_3^{(2)},$$

$$D_3^{(3)} = e_{33} \cdot \frac{\partial u_3^{(3)}}{\partial x_3} + \epsilon_{33}^S \cdot E_3^{(3)},$$

$$D_3^{(4)} = -e_{33} \cdot \frac{\partial u_3^{(4)}}{\partial x_3} + \epsilon_{33}^S \cdot E_3^{(4)}$$

$$S_1 = S_2 = S_4 = S_5 = S_6 = 0$$

$$T_3 = T_4 = T_5 = 0$$

$$E_1 = E_2 = 0$$

$$D_1 = D_2 = 0$$

Tyto rovnice platí pro všechny vrstvy multi-stacku.

Řešením Maxwellovy rovnice a integrováním podle x_3 dostaneme

$$E_3^{(1)} = -\frac{e_{33}}{\epsilon_{33}^S} \cdot \frac{\partial u_3^{(1)}}{\partial x_3} + C^{(1)},$$

$$E_3^{(2)} = \frac{e_{33}}{\epsilon_{33}^S} \cdot \frac{\partial u_3^{(2)}}{\partial x_3} + C^{(2)},$$

$$E_3^{(3)} = -\frac{e_{33}}{\epsilon_{33}^S} \cdot \frac{\partial u_3^{(3)}}{\partial x_3} + C^{(3)},$$

$$E_3^{(4)} = \frac{e_{33}}{\epsilon_{33}^S} \cdot \frac{\partial u_3^{(4)}}{\partial x_3} + C^{(4)},$$

kde $C^{(1)}$, $C^{(2)}$, $C^{(3)}$ a $C^{(4)}$ jsou integrační konstanty.

Dosadíme do pohybové rovnice a dostaneme

$$\rho \frac{\partial^2 u_3^{(q)}}{\partial t^2} = c_{33}^D \frac{\partial^2 u_3^{(q)}}{\partial x_3^2} \quad (4.5)$$

$$\text{kde } c_{33}^D = c_{33}^E + \frac{e_{33}^2}{\epsilon_{33}^S}.$$

Řešení vlnové rovnice je rovinná vlna

$$u_3^{(q)}(x_3, t) = \left[A^{(q)} \sin(k \cdot x_3) + B^{(q)} \cos(k \cdot x_3) \right] e^{j\omega t} \quad (4.6)$$

$$\text{kde } k = \omega \cdot \sqrt{\frac{\rho}{c_{33}^D}}, \quad \omega = 2 \cdot \pi \cdot f.$$

Integrační konstanty $A^{(q)}$ se vypočítají z okrajových podmínek; $A^{(1)} = A^{(4)}$, $A^{(2)} = A^{(3)}$.

Kvůli symetrii vyjdou integrační konstanty $B^{(1)} = -B^{(4)}$ a $B^{(2)} = B^{(3)} = 0$.

Integrační konstanta $C^{(q)}$ se vypočítá z podmínek elektrického pole mezi elektrodami.

$$-U \cdot e^{j\omega t} = - \int_{+b}^{+2b} E_3^{(1)} \cdot dx_3 = -C^{(1)} \cdot b + \frac{e_{33}^s}{\epsilon_{33}} \cdot [u_3^{(1)}(+2b) - u_3^{(1)}(+b)] \quad (4.7)$$

$$U \cdot e^{j\omega t} = - \int_0^{+b} E_3^{(2)} \cdot dx_3 = C^{(2)} \cdot b - \frac{e_{33}^s}{\epsilon_{33}} \cdot [u_3^{(2)}(+b) - u_3^{(2)}(0)] \quad (4.8)$$

$$U \cdot e^{j\omega t} = - \int_0^{-b} E_3^{(3)} \cdot dx_3 = C^{(3)} \cdot b - \frac{e_{33}^s}{\epsilon_{33}} \cdot [u_3^{(3)}(-b) - u_3^{(3)}(0)] \quad (4.9)$$

$$-U \cdot e^{j\omega t} = - \int_{-b}^{-2b} E_3^{(4)} \cdot dx_3 = -C^{(4)} \cdot b + \frac{e_{33}^s}{\epsilon_{33}} \cdot [u_3^{(4)}(-2b) - u_3^{(4)}(-b)] \quad (4.10)$$

Impedance rezonátoru (pro 4 destičky) může být vypočítána z posuvného proudu

$$I_p = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{-w/2}^{+w/2} \int_{-l/2}^{+l/2} (D_3^{(1)} - D_3^{(2)} + D_3^{(3)} - D_3^{(4)}) \cdot dx_1 \cdot dx_2 \right) \quad (4.11)$$

$$\text{pak } Z_4 = \frac{U \cdot e^{j\omega t}}{I_p} = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot 4 \cdot C_0 \cdot k \cdot b}.$$

$$\cdot \left\{ \frac{k_t^4 \cdot \sin^2(k \cdot b) + 2 \cdot k_t^2 \cdot k \cdot b \cdot \sin(k \cdot b) \cdot (1 - 2 \cdot \cos(k \cdot b)) + (k \cdot b)^2 \cdot \cos(2 \cdot k \cdot b)}{2 \cdot k_t^2 \cdot \sin(k \cdot b) \cdot (\cos(k \cdot b) - 1) - k \cdot b \cdot \cos(2 \cdot k \cdot b)} \right\} \quad (4.12)$$

$$\text{kde } C_0 = \epsilon_{33}^s \cdot \frac{w \cdot l}{b},$$

$$k_t^2 = \frac{e_{33}^2}{c_{33}^D \cdot \epsilon_{33}^s} \text{ je tloušťkový koeficient elektromechanické vazby a}$$

$$\eta = \frac{1}{2} \cdot k \cdot b \text{ frekvenční konstanta.}$$

Impedanci rezonátoru lze analogicky odvodit pro **2 destičky**

$$Z_2 = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot 2 \cdot C_0} \left\{ 1 - k_t^2 \cdot \frac{\tan(k \cdot b)}{k \cdot b} \right\} \quad (4.13)$$

a **1 destičku**

$$Z_1 = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_0} \cdot \left\{ 1 - k_t^2 \cdot \frac{\tan(\frac{k \cdot b}{2})}{\frac{k \cdot b}{2}} \right\} \quad (4.14)$$

Poměry rezonančních frekvencí vzhledem ke frekvenci jedné destičky lze vypočítat jen numericky, např. pro $k_1 = 0,48$ (APC 850).

4 destičky

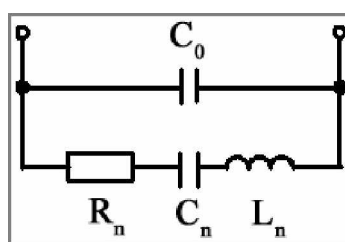
$$k_4 \cdot b = 0,693 \quad \frac{k_4}{k_1} = \frac{f_{r4}}{f_{r1}} = 0,25$$

2 destičky

$$k_2 \cdot b = 1,4085 \quad \frac{k_2}{k_1} = \frac{f_{r2}}{f_{r1}} = 0,50$$

1 destička

$$k_1 \cdot b = 2,817$$



Obrázek 4.2 - Náhradní obvod piezoelektrického rezonátoru v blízkosti rezonance

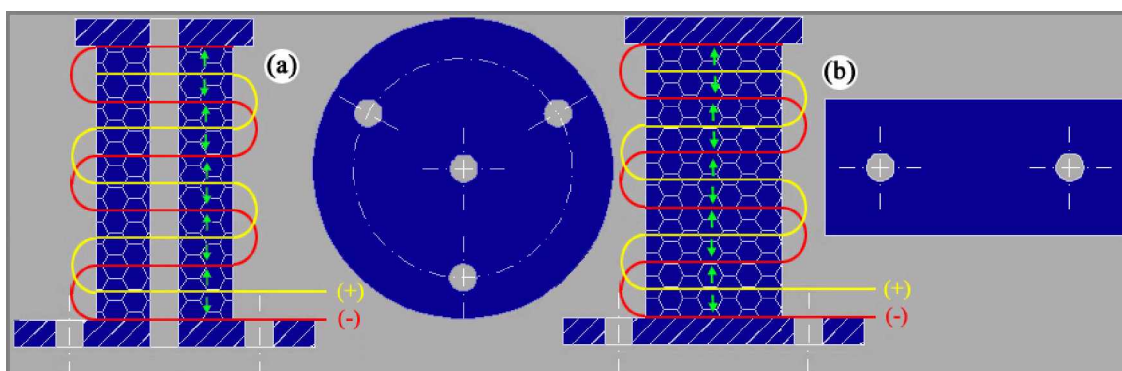
5 Příprava vzorků multi-stack aktuátorů

Jak již bylo zmíněno, pro konstrukci multi-stack aktuátoru je zapotřebí polarizované PZT keramiky, která se postupně navrstvuje. Bylo použito PZT keramiky APC 850; pro obdélníkový multi-stack aktuátor keramika s rozměry jednoho elementu (12 x 6 x 1,1) mm; pro prstencový multi-stack PZT keramika s vnějším průměrem 15 mm, vnitřním 4 mm a tloušťkou 2 mm. Destičky použité v jednotlivých multi-stack aktuátorech jsou společně s jejich piezoelektrický nábojovým koeficientem vypsány v **tabulce 5.1**. Konce navrstvené PZT keramiky a elektrod zakončují kovové destičky s otvory pro upevnění celého multi-stacku. Jejich tvar a pozice v multi-stacku jsou ukázány na **obrázku 5.1**. Multi-stack se připevňuje na měřicí přípravek pomocí šroubků. Při postupném navrstvování elektrod z tenké kovové fólie (**obrázek 5.2a, b**) a PZT keramiky je aplikováno akrylátové lepidlo 3M Scotch-Weld DP810 (dvousložkové). Pro správnou soudržnost celého multi-stacku je nutné destičky a elektrody s lepidlem dostatečně přitlačit. Zemní a budící elektrody jsou multi-stackem střídavě vedeny kolmo na sebe. Směry polarizací jednotlivých destiček jdou proti sobě

(tzn., polarizace 1. destičky směrem dolů, polarizace 2. destičky směrem nahoru atd.) a jsou znázorněny na **obrázku 5.1** pomocí zelených šipek.

d_{33} [pC/N] jednotlivých vrstev multi-stacku (od spod)									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Obdélníkový multi-stack, 8 vrstev, APC 850 (12x6 mm, tloušťka 1,1 mm)									
480	483	485	486	486	488	488	489	x	x
Obdélníkový multi-stack, 10 vrstev, APC 850 (12x6 mm, tloušťka 1,1 mm)									
475	476	477	495	498	501	502	502	503	503
Prstencový multi-stack, 4 vrstvy, APC 850 (průměr 15-4 mm, tloušťka 2 mm)									
429	424	428	425	x	x	x	x	x	x
Prstencový multi-stack, 6 vrstev, APC 850 (průměr 15-4 mm, tloušťka 2 mm)									
415	416	417	417	418	418	x	x	x	x
Prstencový multi-stack, 8 vrstev, APC 850 (průměr 15-4 mm, tloušťka 2 mm)									
423	423	423	423	425	426	426	426	x	x
Prstencový multi-stack, 10 vrstev, APC 850 (průměr 15-4 mm, tloušťka 2 mm)									
410	414	420	420	421	429	443	446	445	447

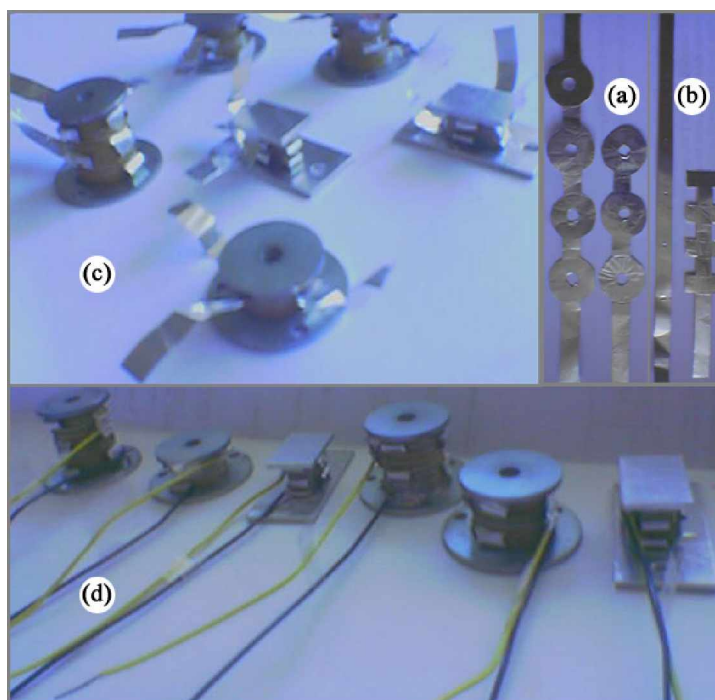
Tabulka 5.1 – Použité obdélníkové, prstencové destičky PZT keramiky a jejich piezoelektrický nábojový koeficient d_{33}



Obrázek 5.1 – Schéma prstencového (a), obdélníkového (b) multi-stack aktuátoru a tvary upevňovacích destiček

V 1. fázi byl vyroben multi-stack ještě bez drátků (**obrázek 5.2c**). Kdybychom použili tento multi-stack pro měření, mohlo by dojít během manipulace mezi jednotlivými měřeními k poškození elektrod (tenká kovová fólie) a k narušení správné činnosti multi-stacku. Proto v 2. fázi byly pomocí stříbrné pasty nalepeny drátky (**obrázek 5.2d**). Ve 3. fázi pomocí tenké plastové fólie a lepicí pásky došlo k zaizolování celého multi-stacku, s ponecháním malého otvoru. Otvorem se vlévala

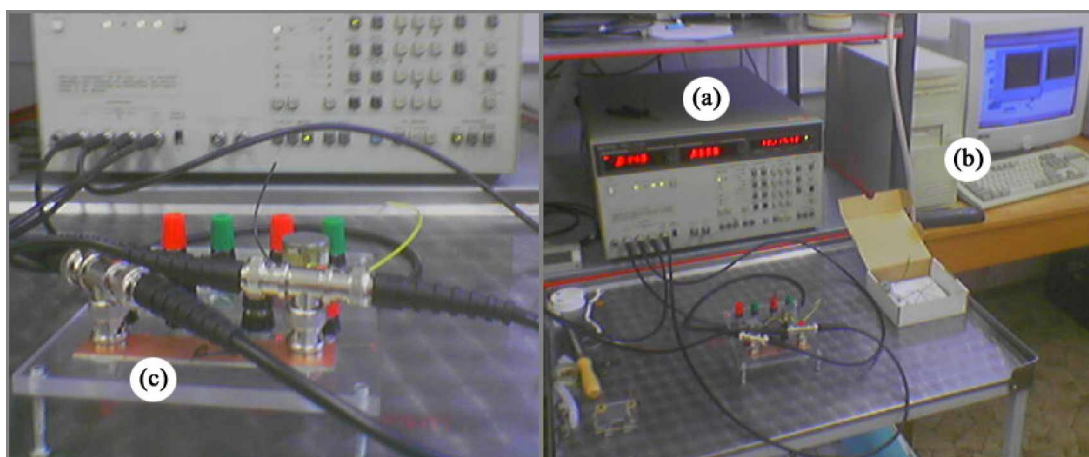
epoxidová zalévací hmota pro elektrotechniku MC34/K21. Hmota má dvě složky (lepidlo a tvrdidlo) a namíchává se ve speciálních poměrech. Ve 4. fázi po několika dnech hmota zatuhla, multi-stack byl očištěn a připraven na měření.



Obrázek 5.2 – Vyráběné multi-stack aktuatory a elektrody z tenké kovové fólie

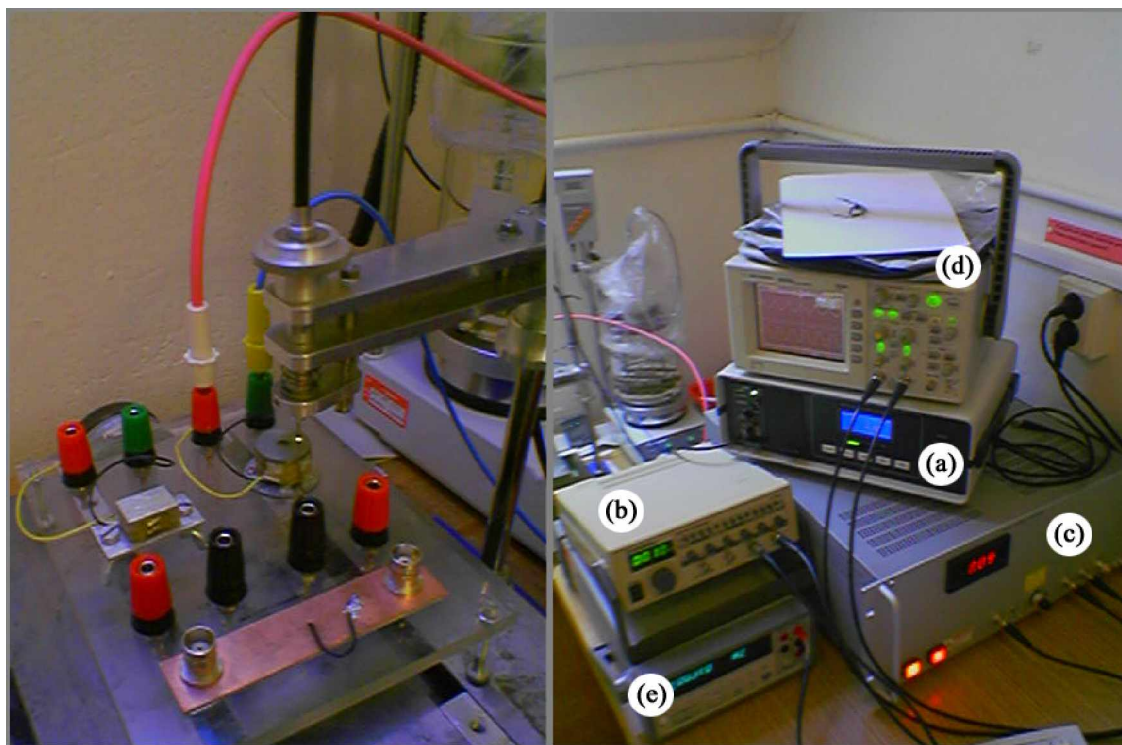
6 Měření parametrů multi-stack aktuatorů

První měření, proměřování frekvenčního spektra multi-stack aktuatorů bylo prováděno na impedančním analyzátoru HP 4192 (obrázek 6.1a). Impedance (fáze) multi-stacku na měřicím přípravku (obrázek 6.1c) je měřena čtyřvodičovou metodou s připojenými BNC konektory. Analyzátor je propojen s PC (obrázek 6.1b) pomocí GPIB karty.



Obrázek 6.1 – Měření impedance a fáze čtyřvodičovou metodou

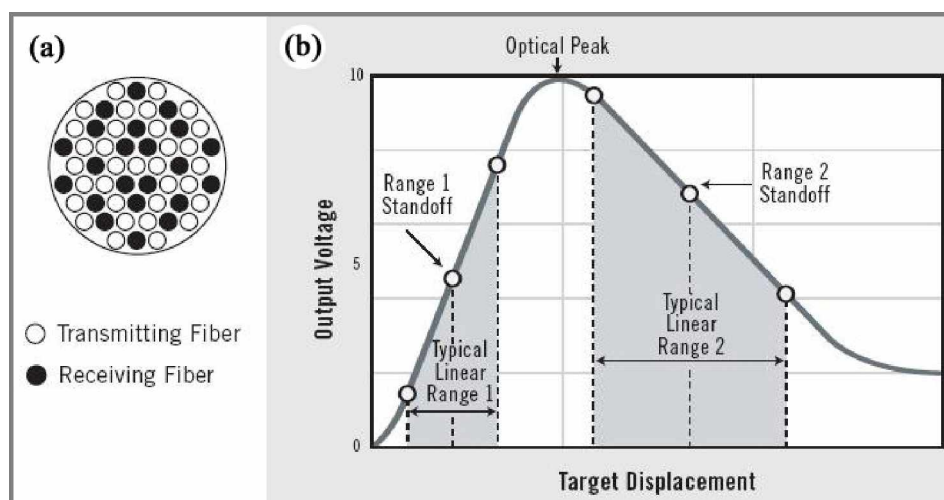
Programové prostředí VEE Pro (verze 6.2) umožňuje proměření parametrů daných vzorků a uložení naměřených dat do textového souboru. Měřicí program také umožňoval zadat rozsah požadovaných frekvencí a měnit úroveň měřicího signálu (do 1,1 V). Vzorky multi-stacků byly proměřeny v rozsahu 10 až 13000 kHz, po 200 vzorcích na dekádu, buzení bylo nastaveno na 0,4 V.



Obrázek 6.2 – Měření výchylky multi-stack aktuátorů

Druhé měření, měření výchylky multi-stack aktuátorů bylo realizováno pomocí optického čidla MTI-2100 FOTONIC SENSOR (**obrázek 6.2a**) a dalších zařízení. Měřicí sestava obsahuje funkční generátor GoldStar FG-2002C (**obrázek 6.2b**) produkující střídavé elektrické napětí (sinus) určité frekvence, které je zesilováno vysokonapěťovým zesilovačem MATSUSADA AMT-5B20 (**obrázek 6.2c**). Osciloskop Agilent DS03102A (**obrázek 6.2d**) snímá zesílené napětí z vysokonapěťového zesilovače a proud, který teče připojeným vzorkem multi-stacku. Abychom mohli na funkčním generátoru nastavit přesnou hodnotu frekvence, snímáme ji multimetrem Agilent 34401A (**obrázek 6.2e**). Optické čidlo nám ukazuje výchylku mezi krajními polohami (peak-to-peak). Měření výchylky bylo prováděno v rozsahu 400 až 800 V, při frekvencích 100 až 500 Hz. Aplikování širších rozsahů frekvencí, napětí neumožnila elektrická omezení vyrobených multi-stacků nebo samy měřicí

přístroje, která jsou vyhodnocena v další části této práce. Po každé výměně vzorku musí dojít ke kalibraci optického čidla.



Obrázek 6.3 – Uspořádání vláken (a) v optické sondě MTI-2062R a kalibrační křivka (b) pro optické čidlo MTI-2100 FOTONIC SENSOR [6]

Pro kalibraci optického čidla se nejdříve pomocí jemného posuvu s optickou sondou přiblížíme ke vzorku; přepneme mód na ovládacím panelu na kalibraci. Opět použitím posuvu najdeme největší hodnotu, která je na kalibrační křivce (obrázek 6.3b) označena jako „Optical Peak“.

Standard Fotonic Probe Specifications							
Probe Module Model No.	Probe Tip Diameter in. (mm)		Cable Length in. (mm)	Maximum Frequency Response (-3 dB) kHz	Output Signal Noise ¹ mV p-p	Meter Resolution ^{2,9} μin. (μm)	
	Total	Active				Range 1	Range 2
MTI-2062R	0.063 (1.600)	0.047 (1.194)	54 (1372)	150	5	1.0 (0.1)	10.0 (0.1)
Range 1 Characteristics			Range 2 Characteristics			Optical Peak ⁵ mils (mm)	
Sensitivity ³ $\frac{\mu\text{in.}}{\text{mV}} \left(\frac{\mu\text{m}}{\text{mV}} \right)$	Linear Range ^{3,4} mils (mm)	Standoff ¹ mils (mm)	Sensitivity ³ $\frac{\mu\text{in.}}{\text{mV}} \left(\frac{\mu\text{m}}{\text{mV}} \right)$	Linear Range ^{3,4} mils (mm)	Standoff ¹ mils (mm)	Mid-point ^{6,7}	Range ⁸
1.0 (0.025)	6.0 (0.152)	5.0 (0.127)	15.0 (0.381)	60.0 (1.524)	70.0 (1.778)	26.0 (0.660)	9.0 (0.229)

Tabulka 6.1 – Parametry použité optické sondy MTI-2062R [6]

Po nalezení této hodnoty se optické čidlo automaticky nakalibruje. Přepneme mód na měření výchylky a pomocí posuvu najdeme hodnotu blížící se nule. Když se přibližujeme směrem ke vzorku nalezneme nulovou hodnotu, která odpovídá kalibračnímu pásmu nalevo od „Optical Peak“. Posouváním směrem na druhou stranu se dostaneme do pravého kalibračního pásma. Pokud už došlo k nalezení nulové hodnoty, mód přepneme na měření výchylky mezi krajními polohami a můžeme měřit přesnou výchylku generovanou multi-stackem.

Optická sonda se skládá z dvou druhů optických vláken; část vláken světlo vysílají a druhá část odražené světlo přijímají (**obrázek 6.3a**). Optické čidlo, sonda snímající výchylku multi-stacku upevněného v měřicím přípravku je ukázána v levé části **obrázku 6.2**, parametry sondy v **tabulce 6.1**. Jelikož se výsledná výchylka multi-stacku mění se vzdáleností od středu, musela být měřena na několika místech vrchní kovové destičky. Posouvání čidla, multi-stacku bylo realizováno pomocí malého supportu, na kterém byl umístěn celý měřicí přípravek.

7 Výsledky měření multi-stack aktuátorů

7.1 Měření rezonanční frekvence

Mimo mechanickou rezonanci se multi-stack chová jako kondenzátor. Při zvyšování frekvence dochází při mechanické rezonanci vzorku k poklesu impedance (ideálně až na $Z = 0$, rezonanční frekvence, f_r).

kapacita obdélníkového multi-stacku

$$C_{OM} = \frac{n \cdot K_{33}^T \cdot \epsilon_0 \cdot l \cdot w}{b} \quad (7.1)$$

kapacita prstencového multi-stacku

$$C_{PM} = \frac{n \cdot K_{33}^T \cdot \epsilon_0 \cdot \pi \cdot (D - d)^2}{4 \cdot b} \quad (7.2)$$

kde

K_{33}^T = relativní permitivita

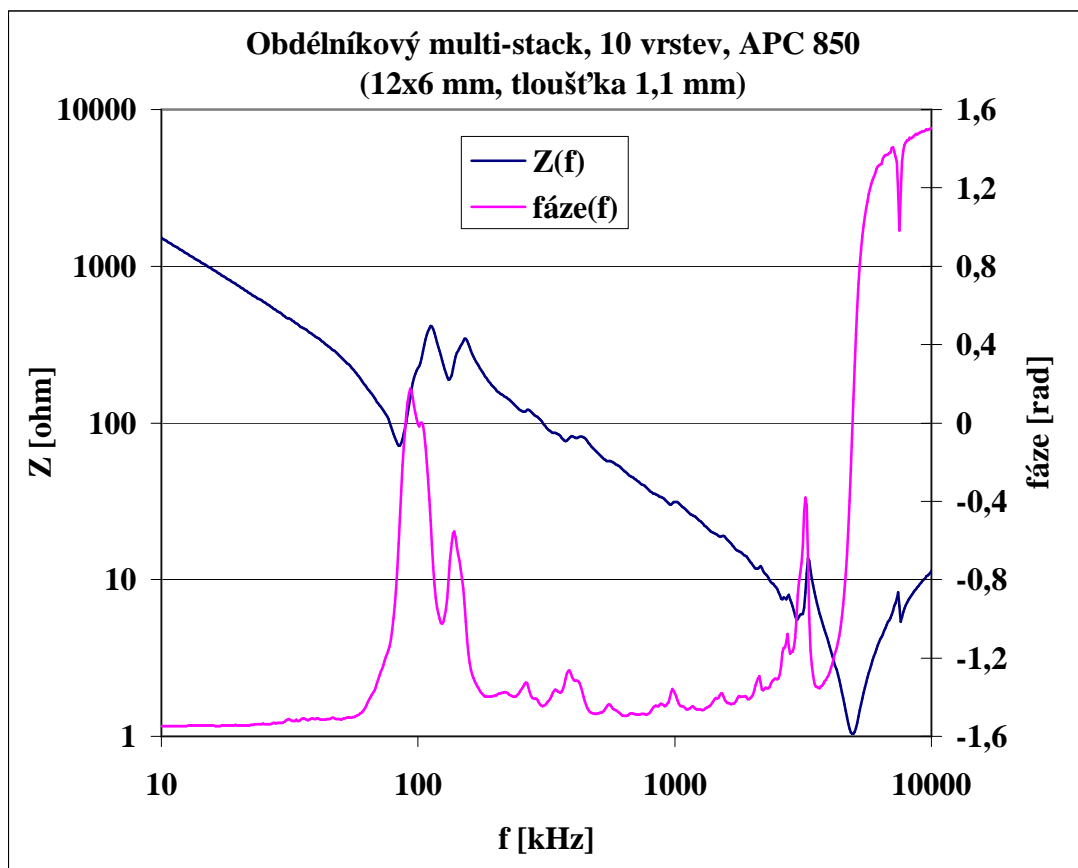
n = počet navrstvených PZT elementů

$D - d$ = rozdíl vnějšího a vnitřního průměru prstencového PZT elementu

b = tloušťka PZT elementu

Počet vrstev	C [nF]	tgδ [--]
Obdélníkový multi-stack, APC 850 (12x6 mm, tloušťka 1,1 mm)		
8	11,4	0,018
10	14,38	0,018
Obdélníkový PZT element	1,3	0,014
Prstencový multi-stack, APC 850 (průměr 15-4 mm, tloušťka 2 mm)		
4	5,97	0,017
6	8,49	0,014
8	11,46	0,014
10	14,44	0,014
Prstencový PZT element	1,525	0,014

Tabulka 7.1 – Naměřená kapacita multi-stacků a samotných PZT elementů

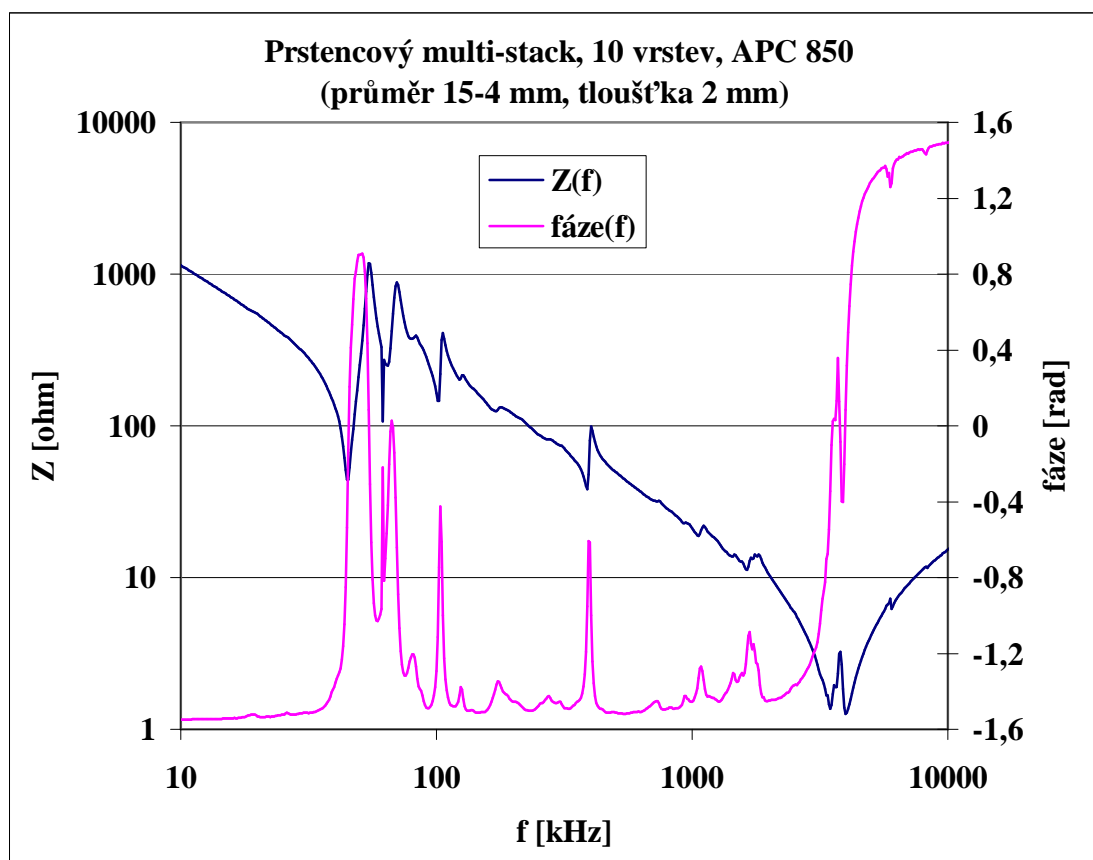


Graf 7.1 – Impedanční spektrum obdélníkového multi-stacku s 10 navrstvenými PZT elementy

		Z [ohm]	ϕ [rad]
Obdélníkový multi-stack, 10 vrstev, APC 850 (12x6 mm, tloušťka 1,1 mm)			
f_r [kHz]	84,14	71,566	-0,616588937
f_a [kHz]	113,501	412,737	-0,624183829
Obdélníkový multi-stack, 8 vrstev, APC 850 (12x6 mm, tloušťka 1,1 mm)			
f_r [kHz]	102,329	220,644	-0,984384812
f_a [kHz]	116,145	352,971	-0,833337417
Obdélníková destička, APC 850 (12x6 mm, tloušťka 1,1 mm)			
f_r [kHz]	2065,38	16,427	0,980767726
f_a [kHz]	2290,868	1634,462	-0,39436755

Tabulka 7.2 – Resonanční (f_r), antiresonanční (f_a) frekvence, hodnoty impedance (Z), fáze (ϕ) obdélníkových multi-stacků a samotného obdélníkového PZT elementu

Když frekvenci dále zvyšujeme, impedance stoupá na maximum (antirezonanční frekvence, f_a). V celém impedančním spektru se vyskytuje několik těchto frekvencí. Mezi f_r a f_a se multi-stack chová jako indukčnost (změna fáze z -90° na $+90^\circ$).



Graf 7.2 – Impedanční spektrum prstencového multi-stacku s 10 navrstvenými PZT elementy

Přibližováním k f_r a f_a dochází k prudké změně znaménka fáze. Obecně pro multi-stacky platí: zvyšováním počtu navrstvených PZT elementů se posouvá rezonanční (antirezonanční) frekvence v impedančním spektru k nižším frekvencím.

Impedanční spektrum jednoho z měřených obdélníkových multi-stacků je ukázáno na **grafu 7.1**. U obdélníkového multi-stacku s 10 vrstvami se rezonanční frekvence zmenšila asi 25krát, vzhledem k rezonanční frekvenci samotného obdélníkového PZT elementu; u obdélníkového multi-stacku s 8 vrstvami se hodnota rezonanční frekvence zmenšila 20krát. Hodnoty rezonanční (antirezonanční) frekvence obdélníkových multi-stacků a samotného obdélníkového PZT elementu jsou vypsány v **tabulce 7.2**.

		Z [ohm]	φ [rad]
Prstencový multi-stack, 10 vrstev, APC 850 (průměr 15-4 mm, tloušťka 2 mm)			
f_r [kHz]	44,668	44,033	-0,535586431
f_a [kHz]	54,325	1174,845	0,085043761
Prstencový multi-stack, 8 vrstev, APC 850 (průměr 15-4 mm, tloušťka 2 mm)			
f_r [kHz]	49,545	121,657	-0,60646028
f_a [kHz]	54,954	317,2681	-0,367014384
Prstencový multi-stack, 6 vrstev, APC 850 (průměr 15-4 mm, tloušťka 2 mm)			
f_r [kHz]	69,984	58,711	-0,223190344
f_a [kHz]	79,433	296,322	0,188387842
Prstencový multi-stack, 4 vrstvy, APC 850 (průměr 15-4 mm, tloušťka 2 mm)			
f_r [kHz]	85,114	142,853	-0,269233973
f_a [kHz]	104,713	1209,514	-0,519986236
Prstencová destička, APC 850 (průměr 15-4 mm, tloušťka 2 mm)			
f_r [kHz]	1011,579	82,632	-1,020663558
f_a [kHz]	1148,154	1749,495	-0,734854441

Tabulka 7.3 – Resonanční (f_r), antirezonanční (f_a) frekvence, hodnoty impedance (Z), fáze (φ) prstencových multi-stacků a samotného prstencového PZT elementu

Impedanční spektrum prstencových multi-stacků bylo proměřeno ve větším rozsahu počtu navrstvených PZT elementů (4, 6, 8, 10). Na **grafu 7.2** je ukázáno impedanční spektrum prstencového multi-stacku s 10 vrstvami. U prstencového multi-stacku s 10 vrstvami se zmenšila rezonanční frekvence, vzhledem k rezonanční frekvence samotného prstencového PZT elementu asi 23krát; u multi-stacku s 8 vrstvami asi 20krát; u multi-stacku s 6 vrstvami asi 15krát a u multi-stacku s 4 vrstvami

12krát. Hodnoty rezonanční (antirezonanční) frekvence (fáze a impedance) prstencových multi-stacků a samotného prstencového PZT elementu jsou vypsány v **tabulce 7.3**. Další grafy z měření frekvenčního spektra multi-stacků jsou v příloze.

7.2 Měření výchylky

Velikost výchylky celého multi-stacku závisí na počtu navrstvených PZT elementů, budícím střídavém elektrickém napětí a piezoelektrickém nábojovém koeficientu jednotlivých PZT elementů. Teoreticky vyjádřenou výchylku multi-stacku reprezentuje rovnice:

$$\Delta b = \frac{1}{2} \cdot l_{pp} = n \cdot b \cdot d_{33} \cdot E_3 = n \cdot d_{33} \cdot U \quad (7.3)$$

$$E_3 = U / b \quad (7.4)$$

kde

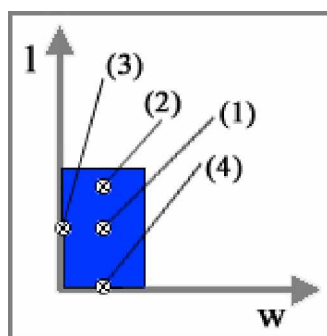
n = počet navrstvených PZT elementů

d_{33} = piezoelektrická nábojová konstanta

E_3 = intenzita elektrického pole ve směru tloušťky (směru osy 3)

b = tloušťka jednoho PZT elementu

Při měření výchylky klesala se vzdáleností od středu vrchní kovové destičky, proto muselo proběhnout několik měření v různých místech na povrchu vrchní kovové destičky.



Obrázek 7.1 – Pozice snímání obdélníkového multi-stacku na povrchu vrchní kovové destičky

Obdélníkový multi-stack byl proměřován v pozicích [l = 8,75 mm, w = 6 mm, (1)]; [l = 13 mm, w = 6 mm, (2)]; [l = 8,75 mm, w = 0 mm, (3)]; [l = 0 mm, w = 6 mm, (4)], viz. **obrázek 7.1**. Obdélníkový multi-stack s 8 vrstvami vykazoval největší výchylku při 500 Hz, ale při této frekvenci se nepodařilo proměřit větší napěťové rozsahy. Změřená výchylka je větší než vypočítaná. Teoretické hodnoty a naměřené hodnoty (**tabulka 7.4**) jsou shodné pouze pro nižší elektrická napětí kolem 400 V. Toto je zhodnoceno v diskuzi výsledků měření. Naměřená výchylka obdélníkových multi-stacků je vyšší než výchylka prstencových multi-stacků.

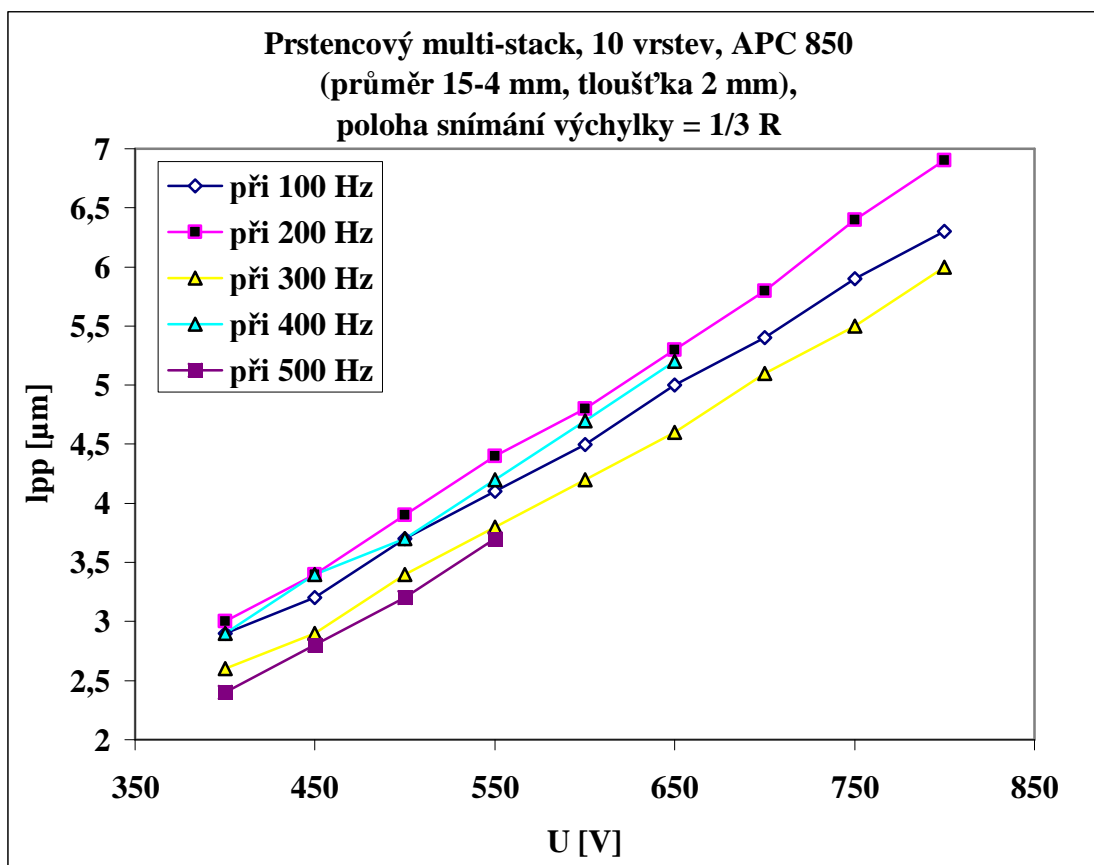
U [V], 300 Hz	400	450	500	550	600	650	700	750
lpp [μm]	3,5	4,1	4,7	5,5	6,1	7	7,8	8,6
Teoretická výchylka	3,1	3,5	3,9	4,3	4,7	5,1	5,4	5,8

Tabulka 7.4 – Výchylka obdélníkového multi-stacku s 8 navrstvenými PZT elementy snímaná uprostřed obdélníkové destičky

U [V]	lpp [μm] při 100 Hz	lpp [μm] při 200 Hz	lpp [μm] při 300 Hz	lpp [μm] při 400 Hz	lpp [μm] při 500 Hz
400	2,9	3	2,6	2,9	2,4
450	3,2	3,4	2,9	3,4	2,8
500	3,7	3,9	3,4	3,7	3,2
550	4,1	4,4	3,8	4,2	3,7
600	4,5	4,8	4,2	4,7	
650	5	5,3	4,6	5,2	
700	5,4	5,8	5,1		
750	5,9	6,4	5,5		
800	6,3	6,9	6		

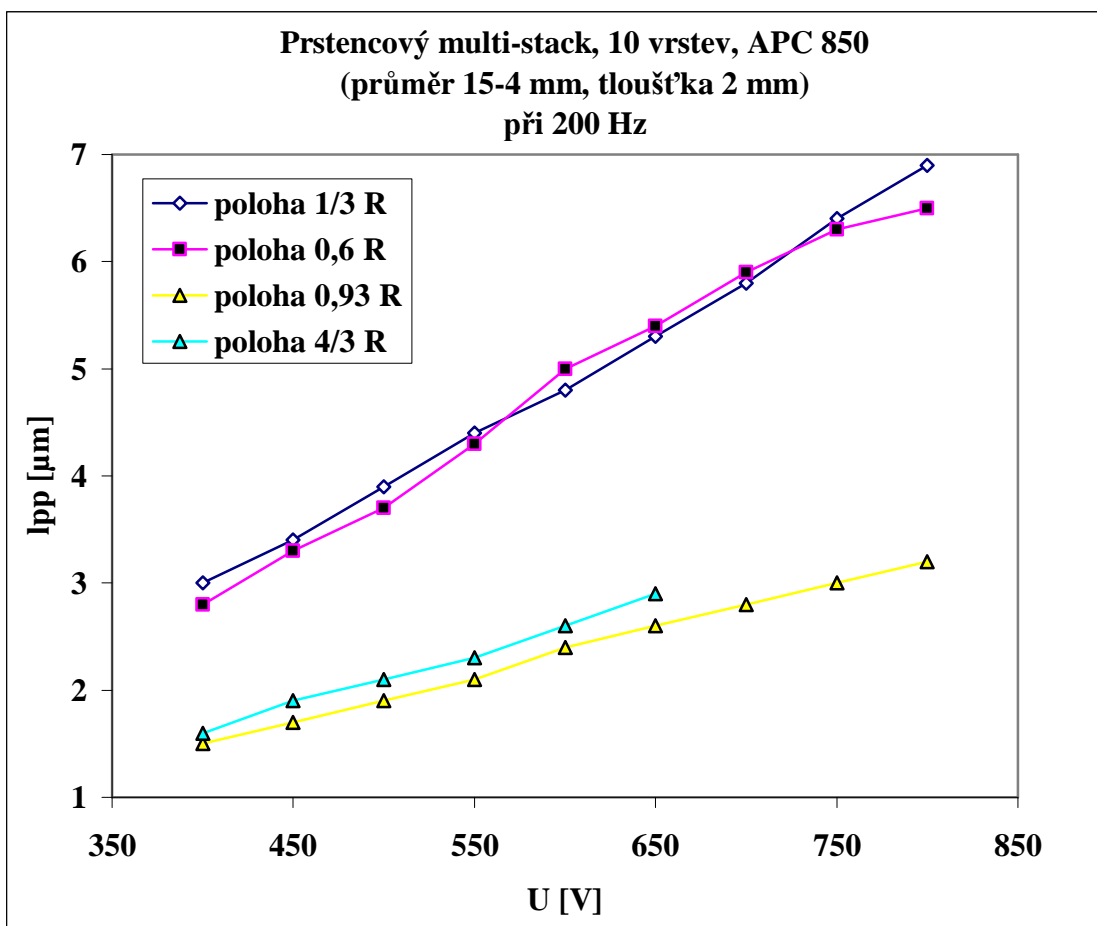
Tabulka 7.5 – Výchylka prstencového multi-stacku s 10 navrstvenými PZT elementy snímaná v poloze 1/3 R (okraj vnitřního otvoru)

Podle teoretických předpokladů by měla výchylka růst s počtem navrstvených PZT elementů, u vyrobených prstencových multi-stacků s poměry 6:4 (3/2), 8:6 (4/3) a 10:8 (5/4). Prstencové multi-stacky byly snímány v poloze 1/3 R; 0,6 R; 0,93 R, 4/3 R, kde R je vnější poloměr keramické destičky (tzn. 15 mm). V polohách 1/3 R a 0,6 R byla výchylka skoro stejná. Prstencový multi-stack s 10 vrstvami (**graf 7.3**) vykazoval největší výchylku na kraji vnitřního otvoru prstence při hodnotách napětí s frekvencí okolo 200 Hz (**tabulka 7.5**).



*Graf 7.3 – Výchylka prstencového multi-stacku s 10 navrstvenými PZT elementy
snímaná v poloze 1/3 R (okraj vnitřního otvoru)*

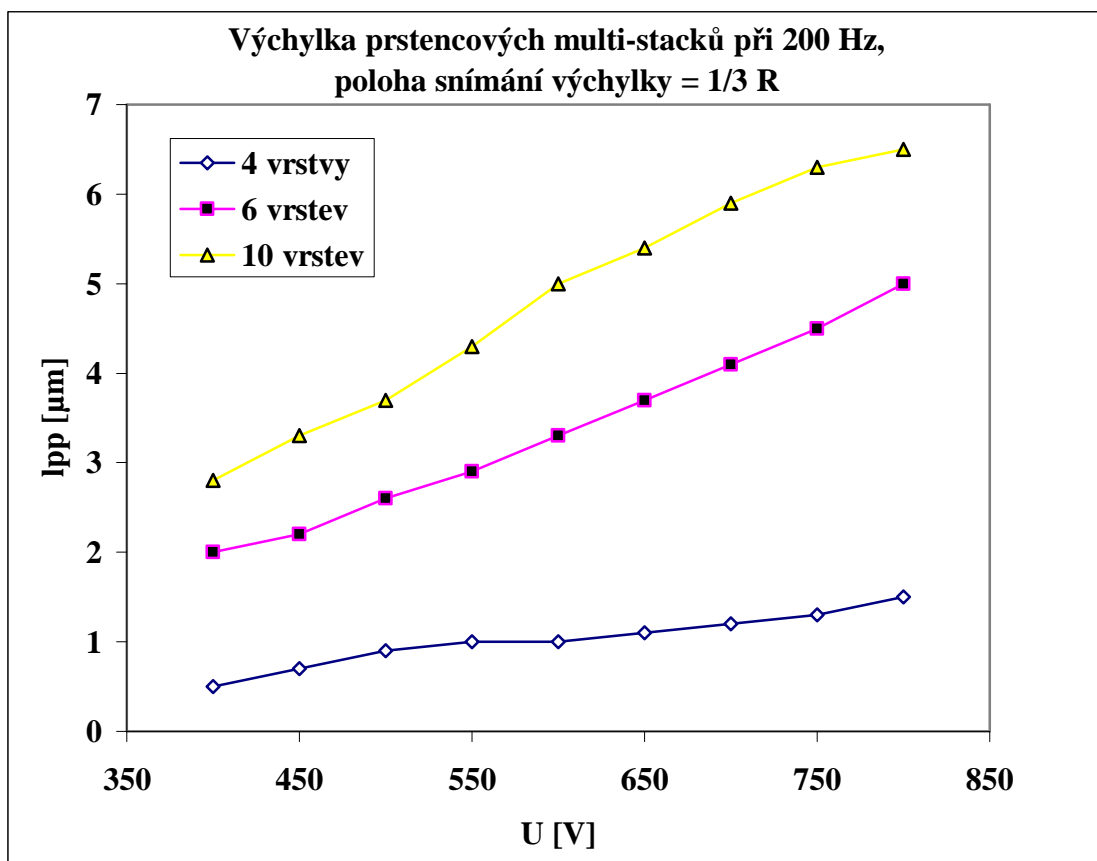
Na **grafu 7.4** můžeme vidět výchylku 10vrstvého multi-stacku snímanou v různých pozicích na vrchní kovové destičce, při frekvenci budícího napětí kolem 200 Hz. Prstencové multi-stacky s menším počtem destiček měly vyšší výchylku při napětích o frekvenci kolem 300 Hz, např. 6vrstvý multi-stack (**tabulka 7.6**). Porovnání výchylky prstencových multi-stacků v závislosti na budícím střídavém elektrickém napětí je ukázáno na **grafu 7.5**. V **tabulce 7.7** můžeme vidět změřené, porovnané hodnoty výchylek prstencových multi-stacků a v **tabulce 7.8** hodnoty vypočítané. Naměřené hodnoty výchylky jsou proti vypočítaným hodnotám o něco větší, pouze u prstencového multi-stacku se 4 vrstvami jsou naměřené hodnoty zhruba o polovinu menší. Multi-stack s 6 vrstvami má oproti 4vrstvému 3,3krát větší výchylku (**tabulka 7.7**). Poměření výchylek 10 a 6vrstvého multi-stacku odpovídá předpokladům chování vyrobeného multi-stacku. Další grafy z měření výchylky multi-stacků jsou v příloze.



Graf 7.4 – Výchylka prstencového multi-stacku s 10 navrstvenými PZT elementy
snímaná v různých pozicích (při 200 Hz)

U [V]	lpp [μm] při 100 Hz	lpp [μm] při 200 Hz	lpp [μm] při 300 Hz	lpp [μm] při 400 Hz	lpp [μm] při 500 Hz
400	2,2	2	3,2	2,8	3,2
450	2,5	2,2	3,7	3,3	3,6
500	3,2	2,6	4,3	3,9	4,1
550	3,4	2,9	4,8	4,3	4,3
600	3,7	3,3	5,2	4,8	5,1
650	4	3,7	5,9	5,4	5,6
700	4,3	4,1	6,4	5,8	6
750	4,8	4,5	6,9	6,4	6,5
800	5,2	5	7,6	7	6,9

Tabulka 7.6 – Výchylka prstencového multi-stacku s 6 navrstvenými PZT elementy
snímaná v poloze 1/3 R (okraj vnitřního otvoru)



Graf 7.5 – Výchylka prstencových multi-stacků snímána v poloze 1/3 R (okraj vnitřního otvoru)

lpp [μm] při 200 Hz prstencových multi-stacků			
U [V]	4 vrstvy	6 vrstev	10 vrstev
400	0,5	2	2,8
450	0,7	2,2	3,3
500	0,9	2,6	3,7
550	1	2,9	4,3
600	1	3,3	5
650	1,1	3,7	5,4
700	1,2	4,1	5,9
750	1,3	4,5	6,3
800	1,5	5	6,5
	3,3 (průměrný poměr 6:4)		1,5 (průměrný poměr 10:6)

Tabulka 7.7 – Naměřená výchylka prstencových multi-stacků v poloze 1/3 R (okraj vnitřního otvoru)

teoretická výchylka - lpp [μm] prstencových multi-stacků			
4 vrstvy	6 vrstev	8 vrstev	10 vrstev
1,6	2	2,7	3,4
1,7	2,3	3,1	3,9
1,9	2,5	3,4	4,3
2,1	2,8	3,7	4,7
2,3	3	4,1	5,2
2,5	3,3	4,4	5,6
2,7	3,5	4,8	6
2,9	3,8	5,1	6,4
3,1	4	5,4	6,9
1,5 (poměr 6:4)	1,33 (poměr 8:6)	1,25 (poměr 10:8)	

Tabulka 7.8 – Teoretická výchylka prstencových multi-stacků

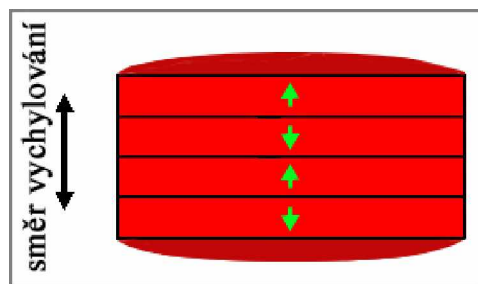
8 Diskuze a chyby měření

Jak již bylo zmíněno, rezonanční frekvence se s počtem navrstvených PZT elementů posouvala směrem k nižším frekvencím (v řádu kHz), to odpovídá teorii. Teoretický poměr rezonanční frekvence 4vrstvého multi-stacku (f_{r4}) a jednoho PZT elementu (f_{r1}) vyšel po numerickém výpočtu 0,25 (viz. 4.). Naměřená hodnota rezonanční frekvence 4vrstvého multi-stacku je 85 kHz a samotného PZT elementu 1,012 MHz; to odpovídá poměru kolem 0,08. Takže jsme dosáhli navrstvením posunu rezonanční frekvence k ještě nižším frekvencím. Poměry naměřených rezonančních frekvencí dalších multi-stacků vzhledem k rezonanční frekvenci samotné PZT keramiky jsou: u 6vrstvého multi-stacku 0,069; u 8vrstvého 0,049 a u 10vrstvého 0,044.

Během měření došlo k neznámému poškození 8vrstvého prstencového a 10vrstvého obdélníkového multi-stacku, proto nemohla být proměřena jejich výchylka, ale pouze impedanční spektrum. Poškození vzniklo zřejmě kvůli nedostatečně zaschlé zalévací hmotě, kterou se celý multi-stack s elektrodami a drátky zaléval. Přisuzuji to z části zatvrdlé zalévací hmotě, která stékala po stěnách multi-stacku, tím došlo k ohnutí zemnicí / budící elektrody (obloučků po stranách multi-stacku) a k vodivému spojení obou elektrod.

Výchylka s počtem navrstvených destiček a se zvyšujícím střídavým elektrickým napětím rostla, to odpovídá teorii. Předpokládám, že výchylka díky

slepení nebo zalití bude menší, proto bylo překvapivé, že byla v některých případech větší než vypočítaná. U 6vrstvého prstencového multi-stacku o $1\text{ }\mu\text{m}$ a u 8-mi vrstvého obdélníkového multi-stacku dokonce o $2,8\text{ }\mu\text{m}$. Musíme však uvážit, že použitá optická sonda byla umístěna v prostředí s několika dalšími přístroji, které určitě generovaly nějaké rušivé vibrace. Maximální aplikované elektrické napětí bylo 800 V. Větší napětí nebyla aplikovaná, jelikož by mohlo dojít k překročení elektrické pevnosti použité PZT keramiky a tím ke zničení celého multi-stacku.



Obrázek 8.1 – Deformace 4 navrstvených destiček

Multi-stack se nehomogeně vychyloval v závislosti na vzdálenosti od středu destičky, kde byla výchylka největší. To odpovídá teoretickým předpokladům. Na **obrázku 8.1** je naznačena deformace (tmavší červenou barvou) 4 navrstvených destiček po aplikování elektrického napětí. Destičky bez volné plochy se nemají kam planárně vychylovat, proto se vychylují pouze ve směru délky. U prstencových destiček se vychylují také směrem do vnitřního otvoru.

Výchylka se málo měnila také s frekvencí střídavého elektrického napětí (sinus). Tyto změny jsou v rozsahu použitých frekvencí (100-500 Hz) zřejmě způsobeny nestabilitou kmitočtu funkčního generátoru, případně paměťovými efekty ve struktuře multi-stacků.

Chyba měření výchylky je na použitém měřicím rozsahu $0,1\text{ }\mu\text{m}$. Relativní chyby měření výchylek $1\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$ potom činí řádově 1-10 %.

9 Závěr

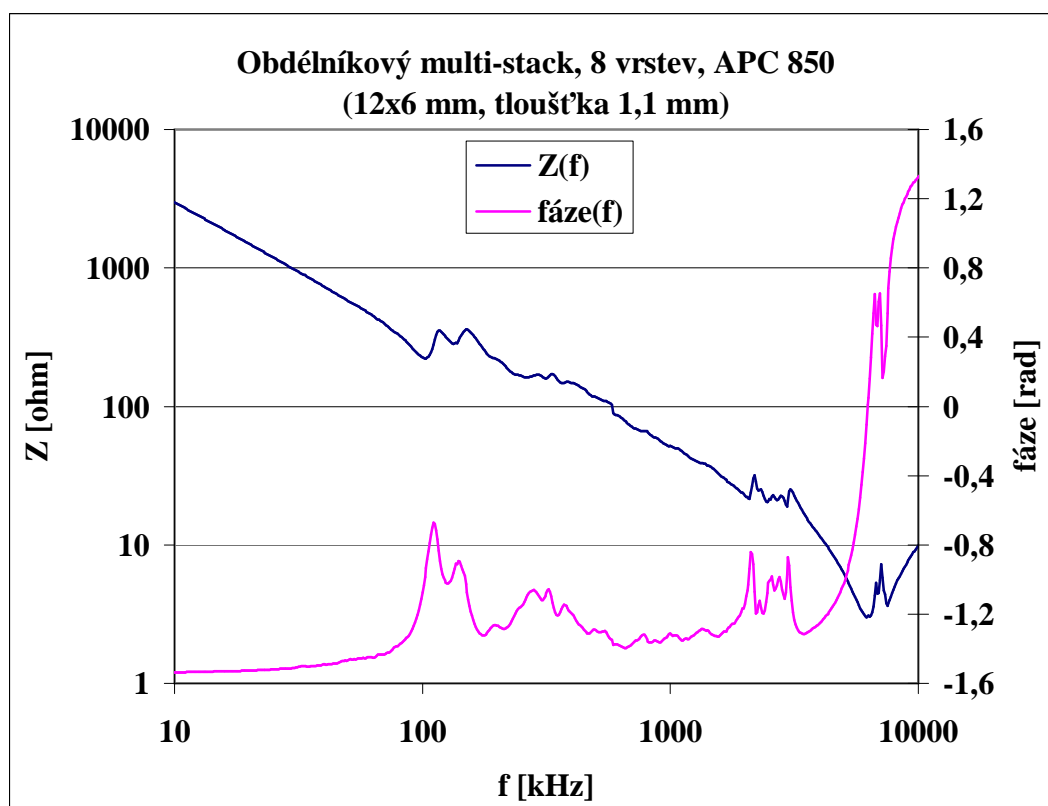
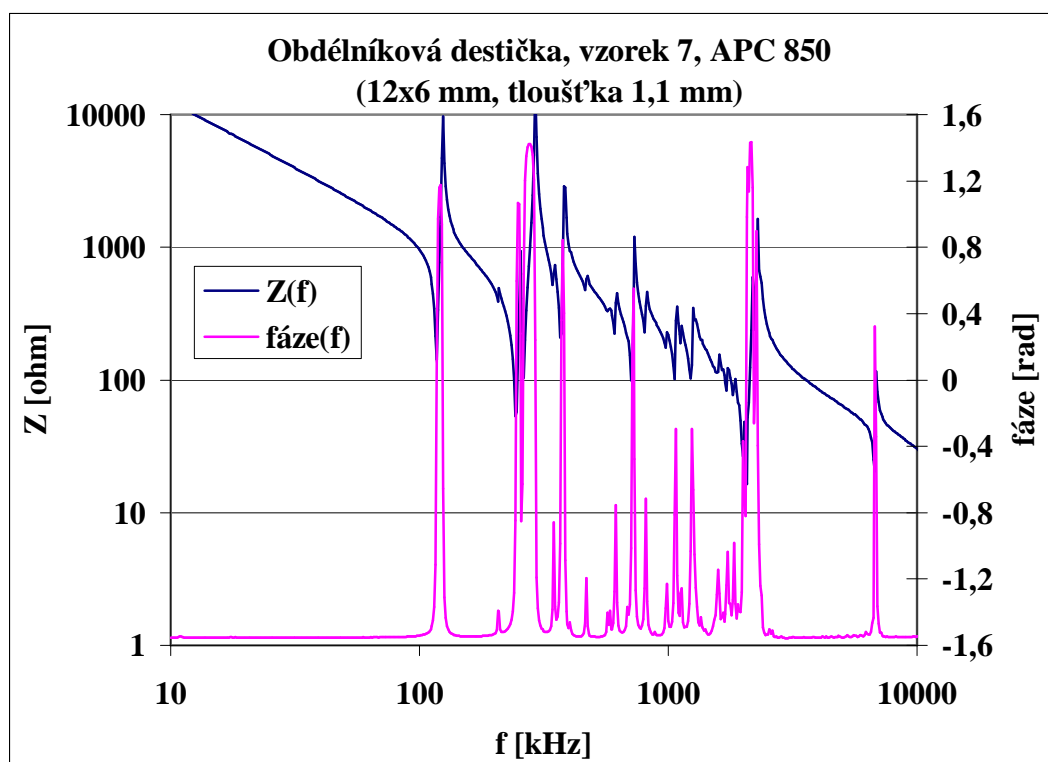
Po obecném seznámením s piezoelektrickou keramikou, bylo úkolem této práce teoretické a praktické vyhodnocení chování multi-stack aktuátorů. Vzorky experimentálně sestavených multi-stacků byly vyhodnoceny v rámci rezonanční frekvence a generované výchylky.

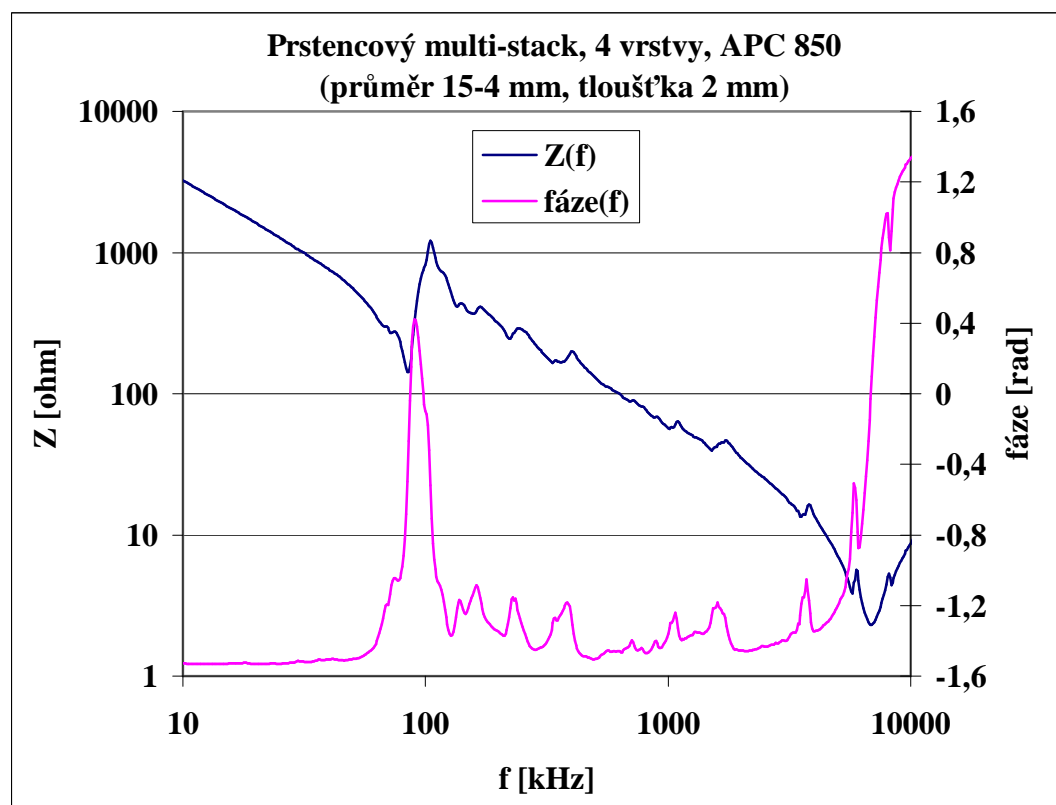
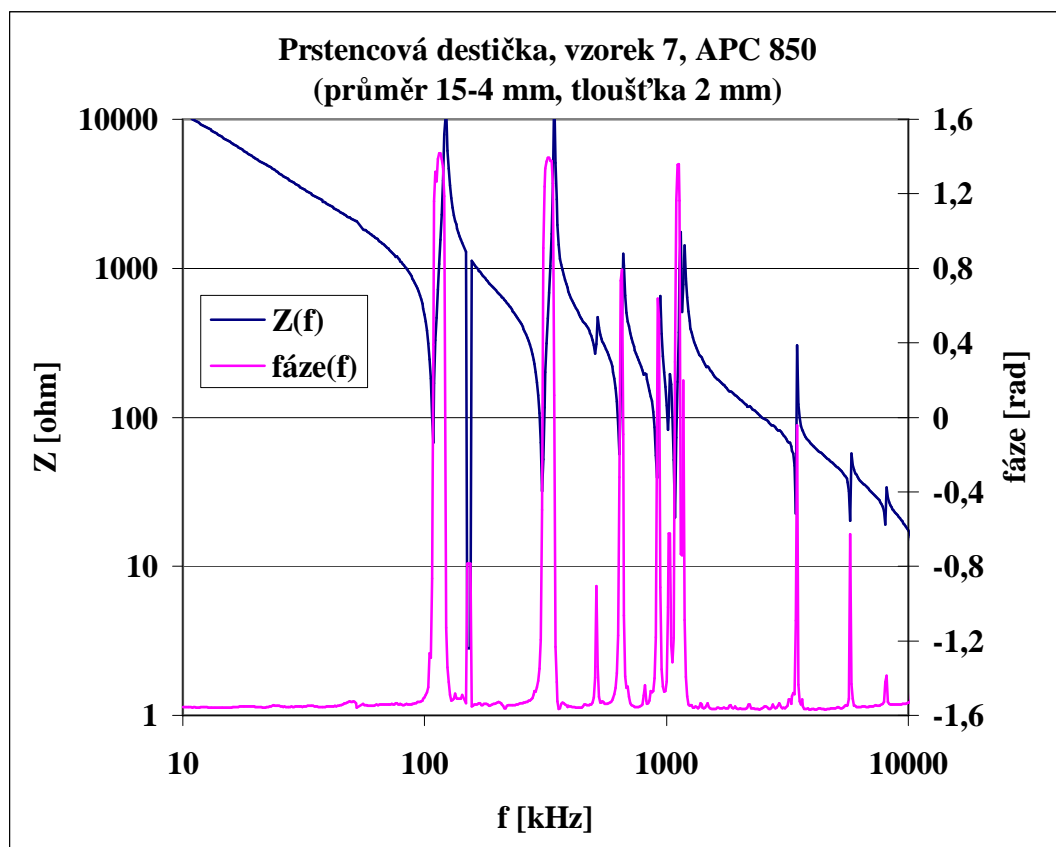
Pomocí čtyřvodičové metody bylo proměřeno impedanční spektrum multi-stacků v rozsahu 10 až 13000 kHz, při konstantním buzení. Z naměřených dat se zjistila rezonanční frekvence jednotlivých multi-stacků. Měření výchylky bylo realizováno optickým čidlem a vysokonapěťovým zesilovačem, který zesiloval napětí aplikované na vzorky. Výchylka byla proměřena v rozsahu 400 až 800 V, při frekvencích 100 až 500 Hz.

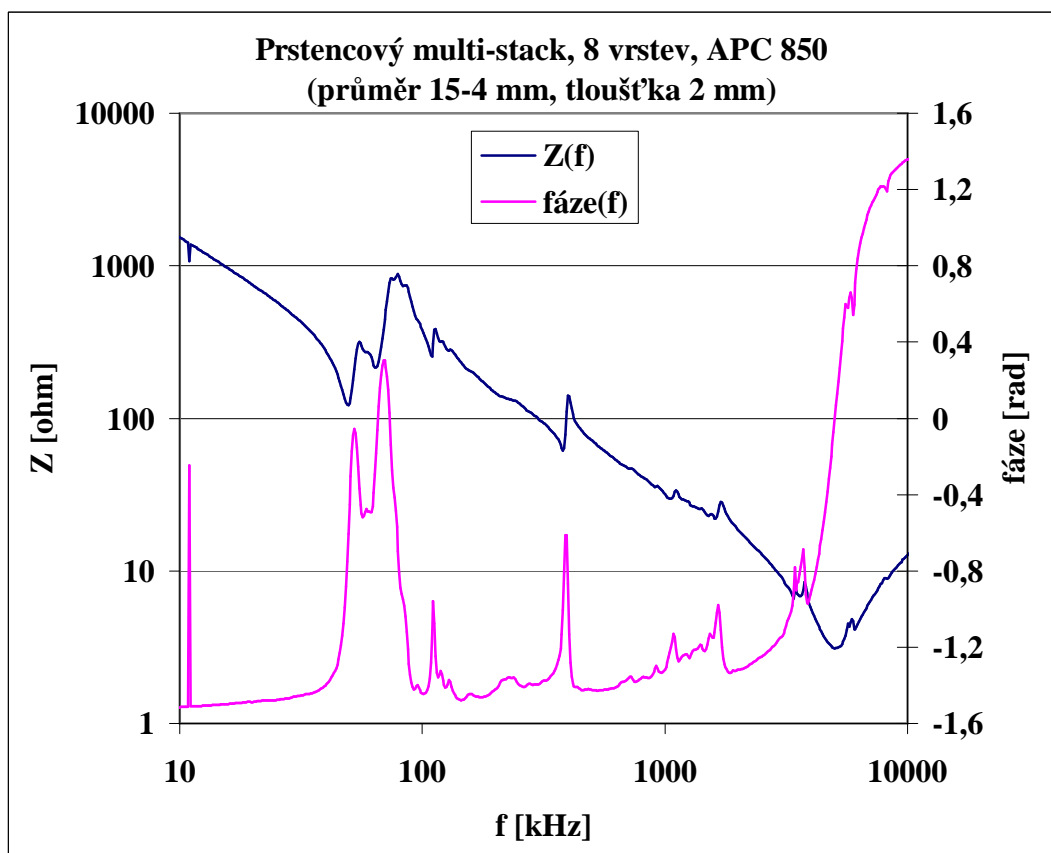
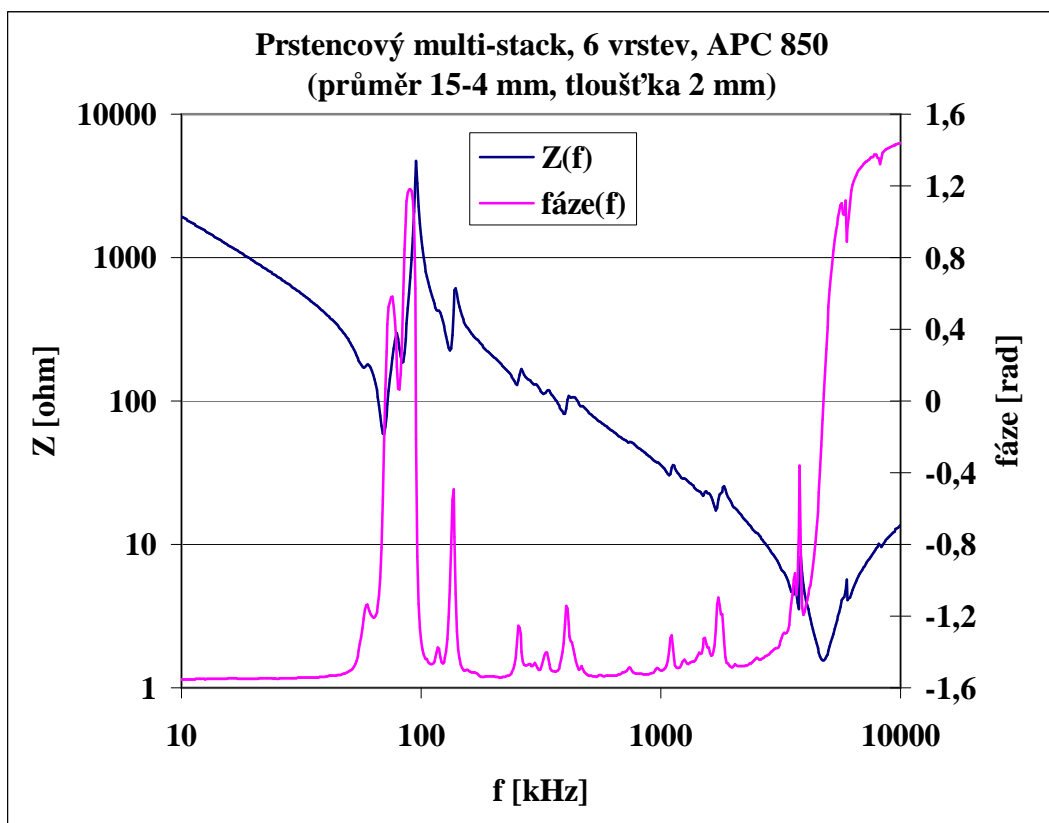
Navrstvením PZT elementů bylo dosaženo posunutí rezonanční frekvence k nižším frekvencím, dokonce k ještě nižším než jsou frekvence vypočítané (konkrétně 4vrstvý prstencový multi-stack). Výchylka se měnila v závislosti na poloze měření, frekvenci a samozřejmě na velikosti aplikovaného elektrického napětí. Dosažená výchylka byla v řádu μm . U některých multi-stacků byla výchylka srovnatelná s vypočítanými hodnotami, ale u dalších o něco větší. Např. 8vrstvý obdélníkový multi-stack vykazoval maximální hodnotu výchylky $8,6 \mu\text{m}$, tzn. hodnotu o $2,8 \mu\text{m}$ větší, vzhledem k vypočítaným hodnotám.

10 Příloha

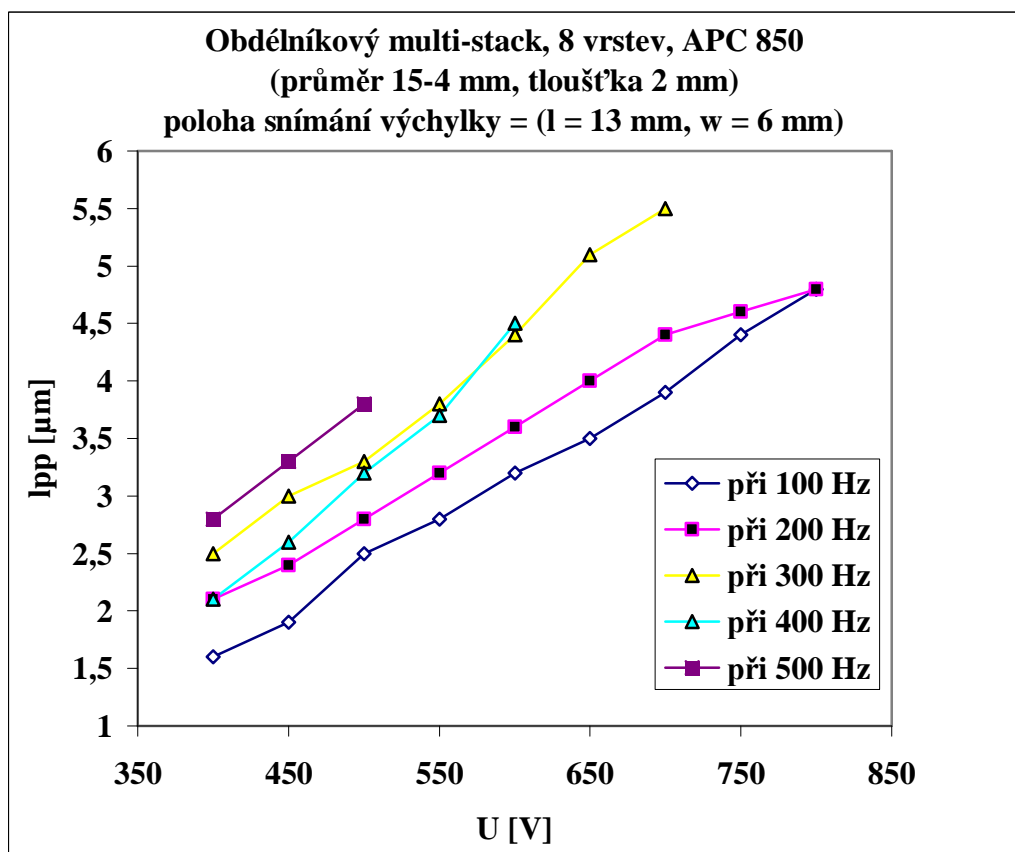
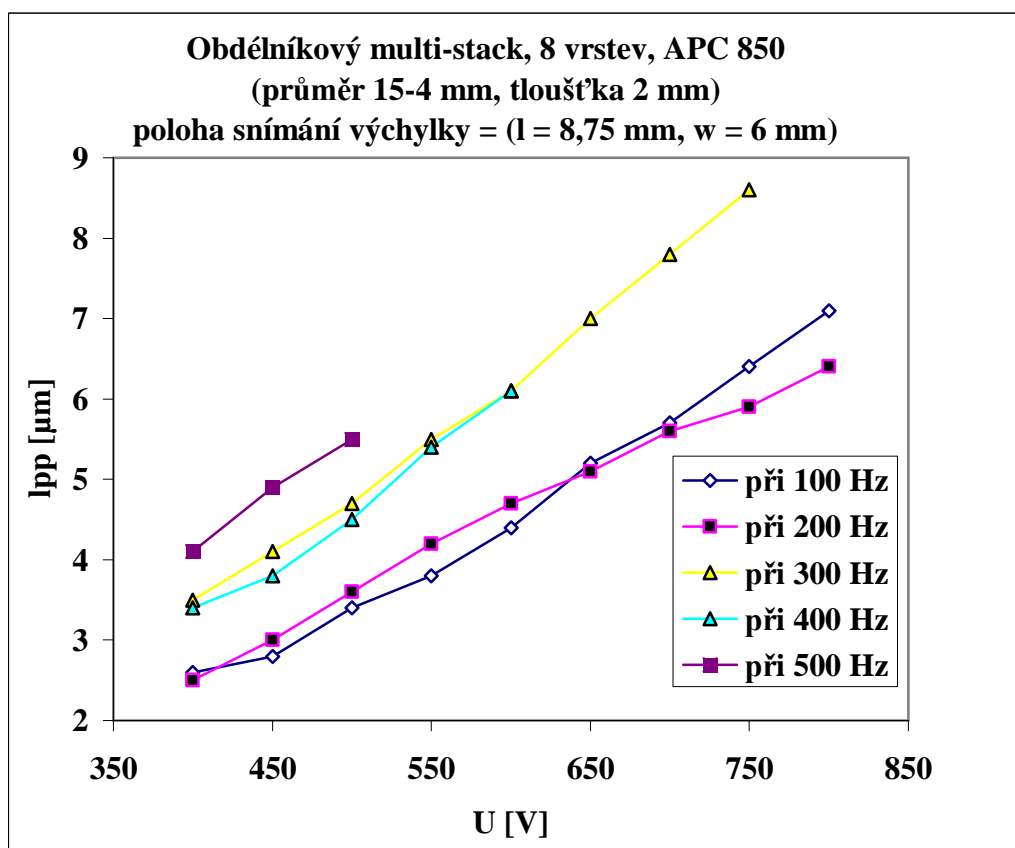
10.1 Grafy - měření impedančního spektra

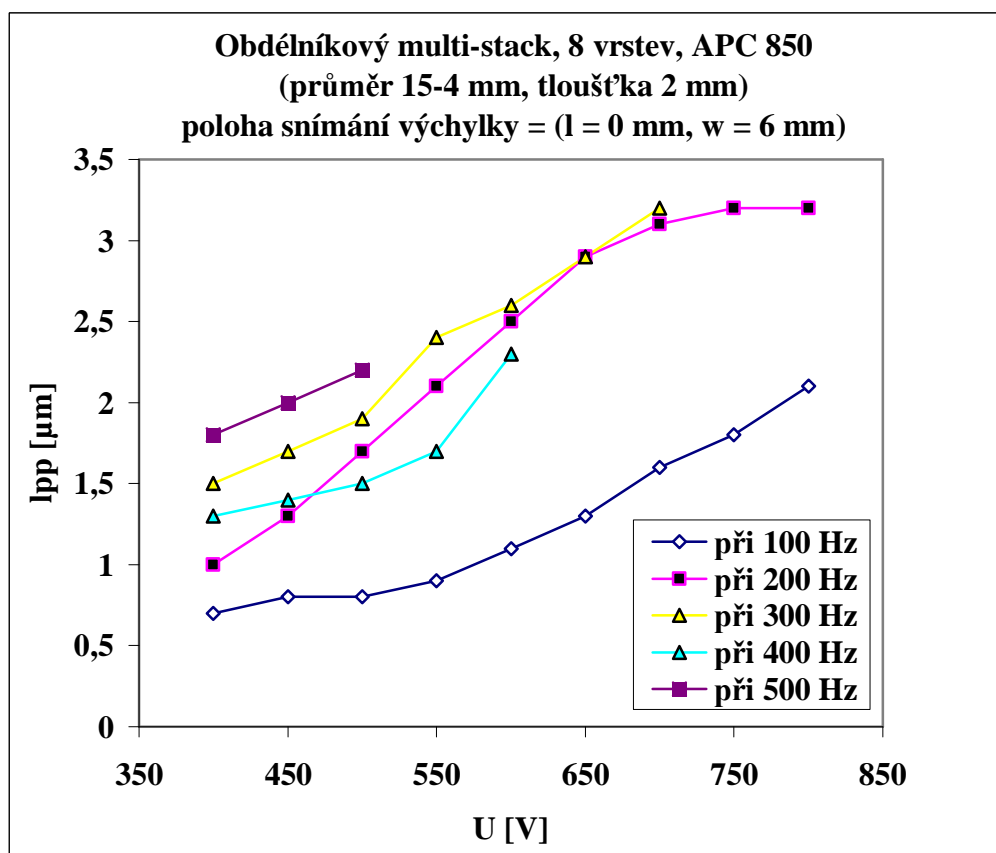
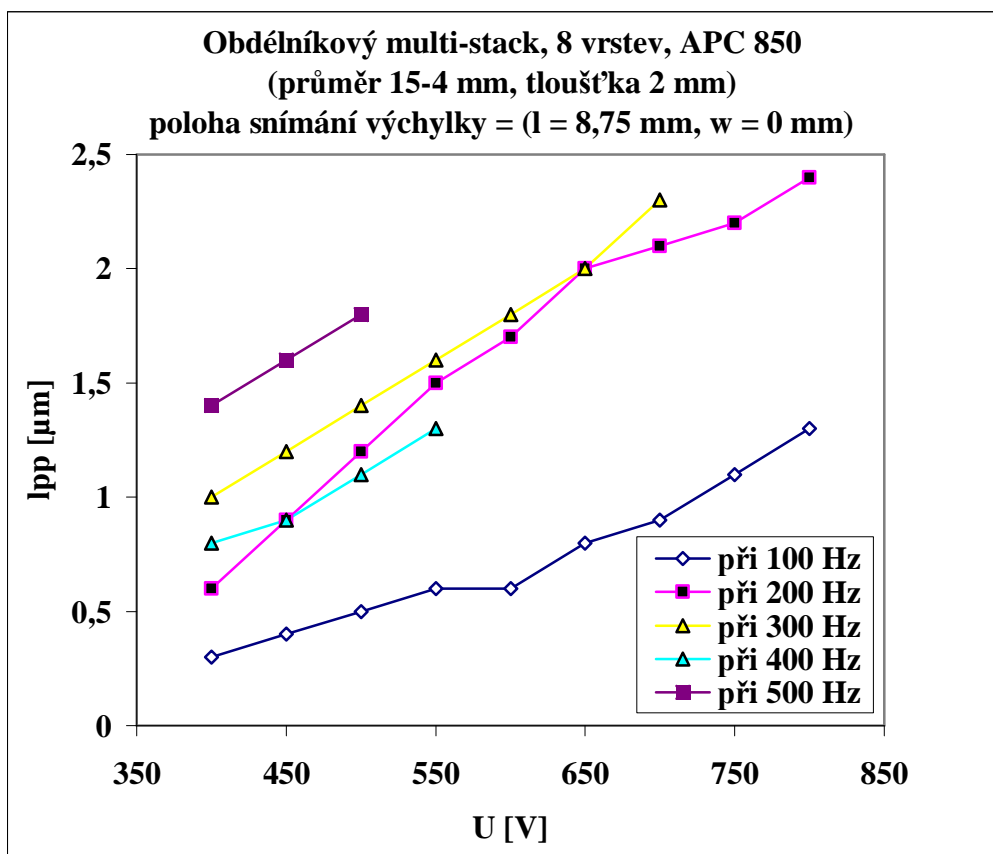


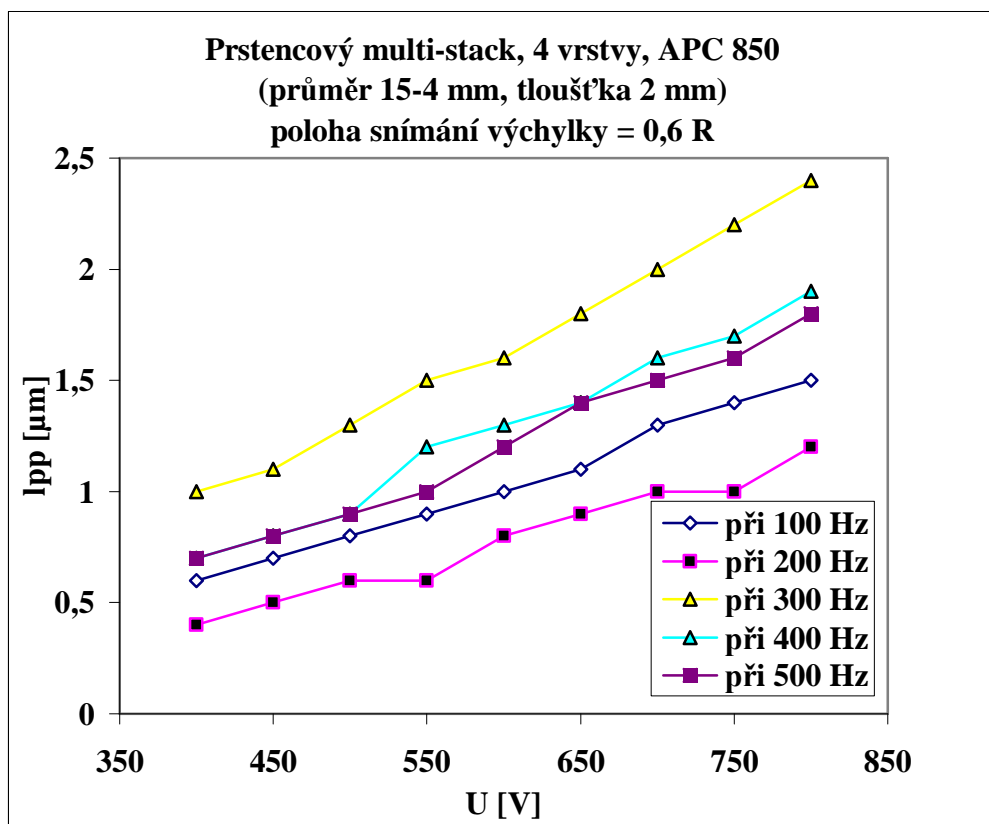
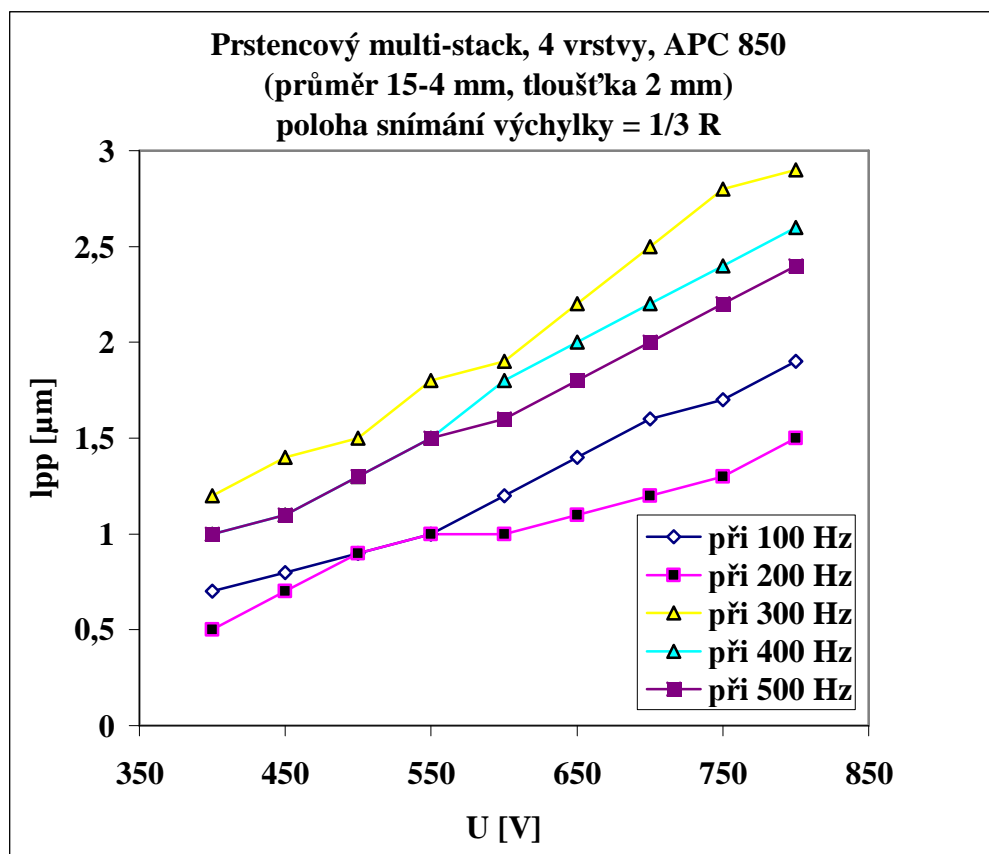


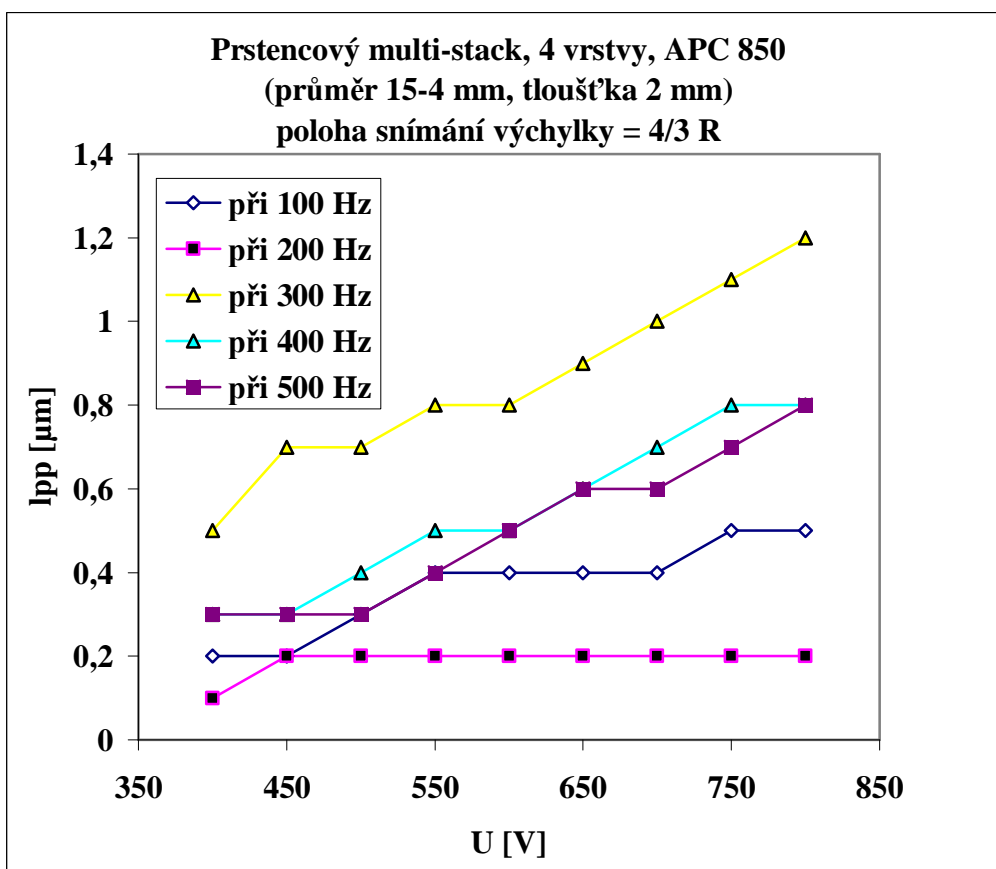
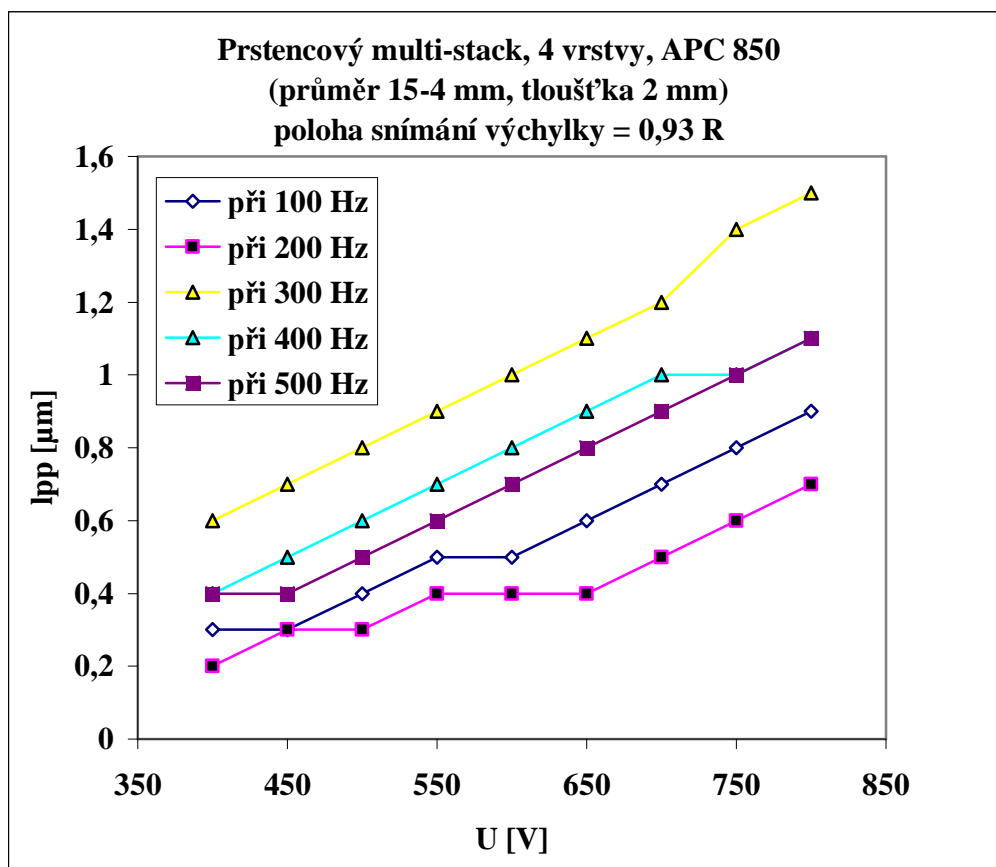


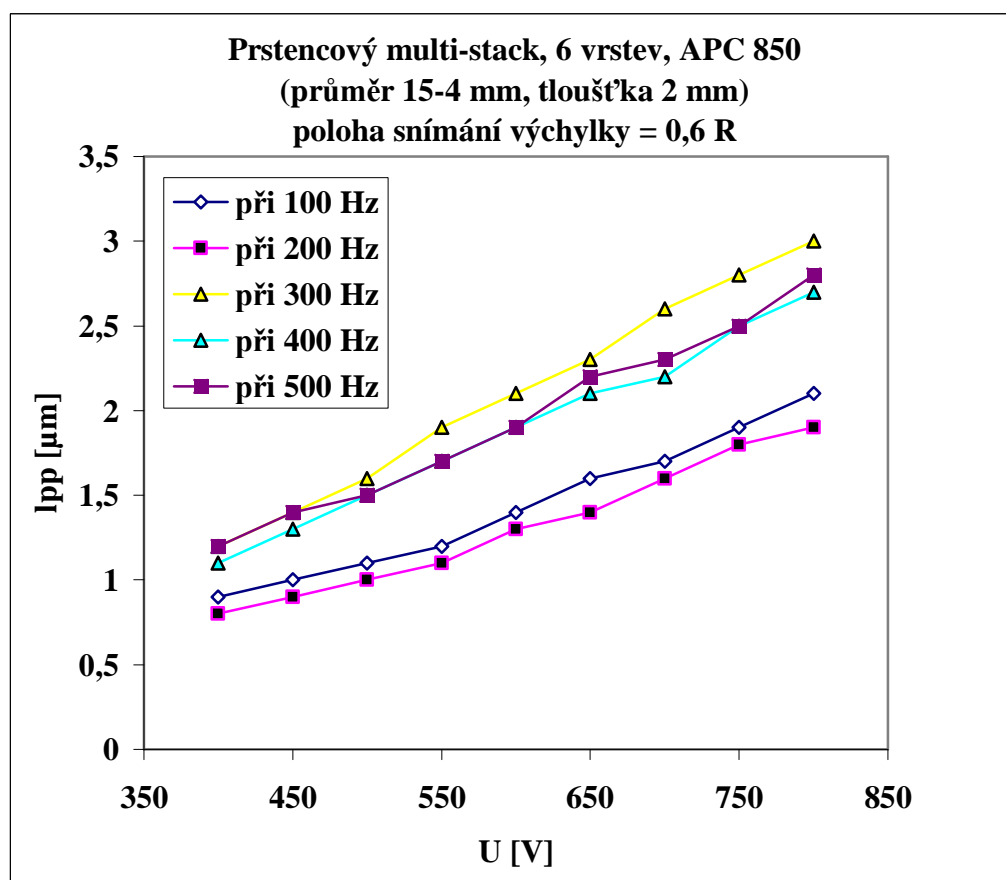
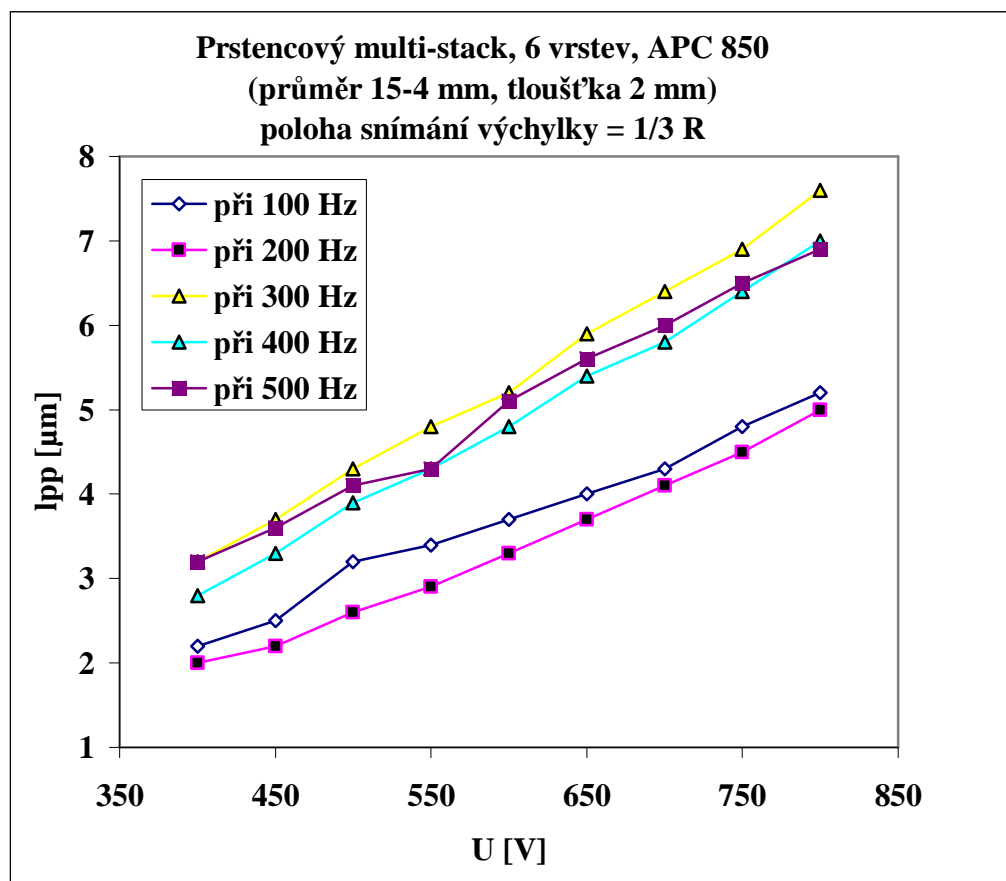
10.2 Grafy - měření výchylky

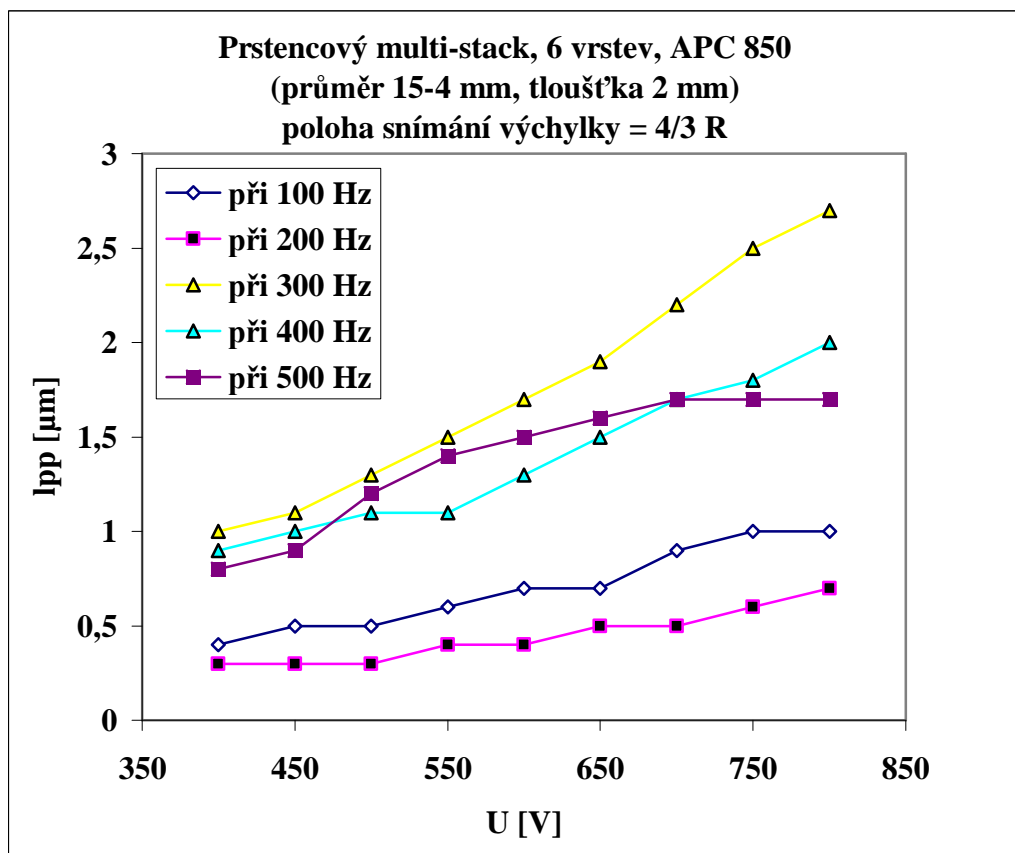
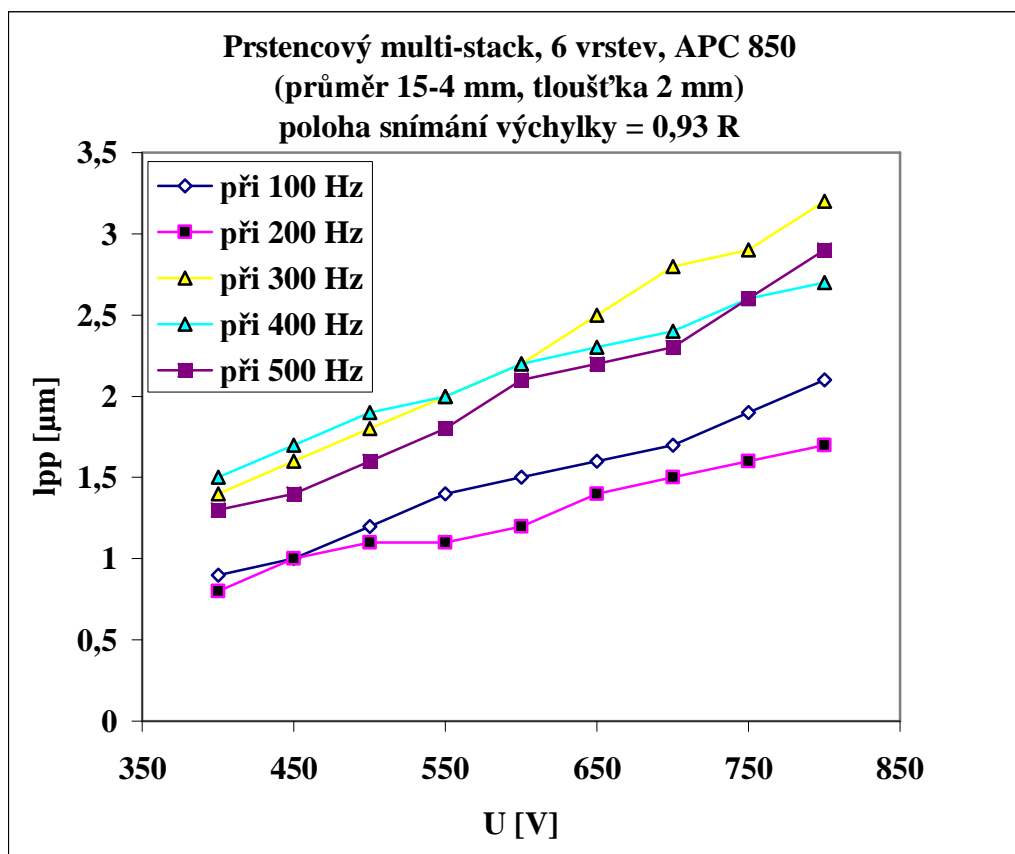


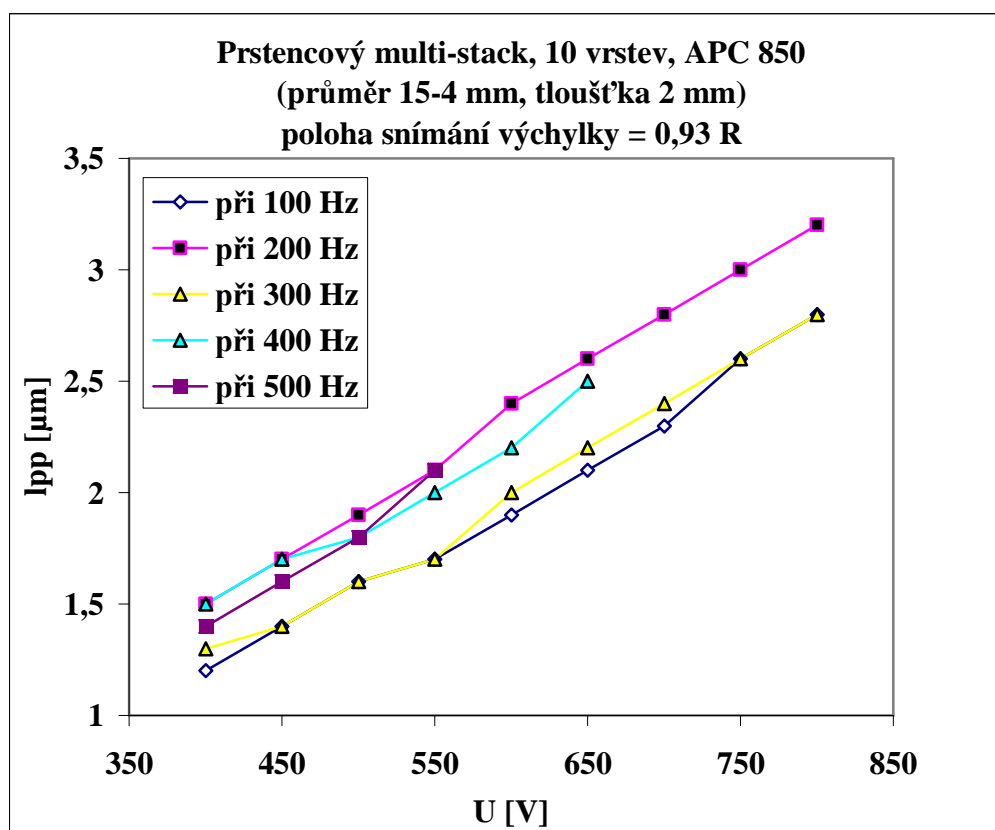
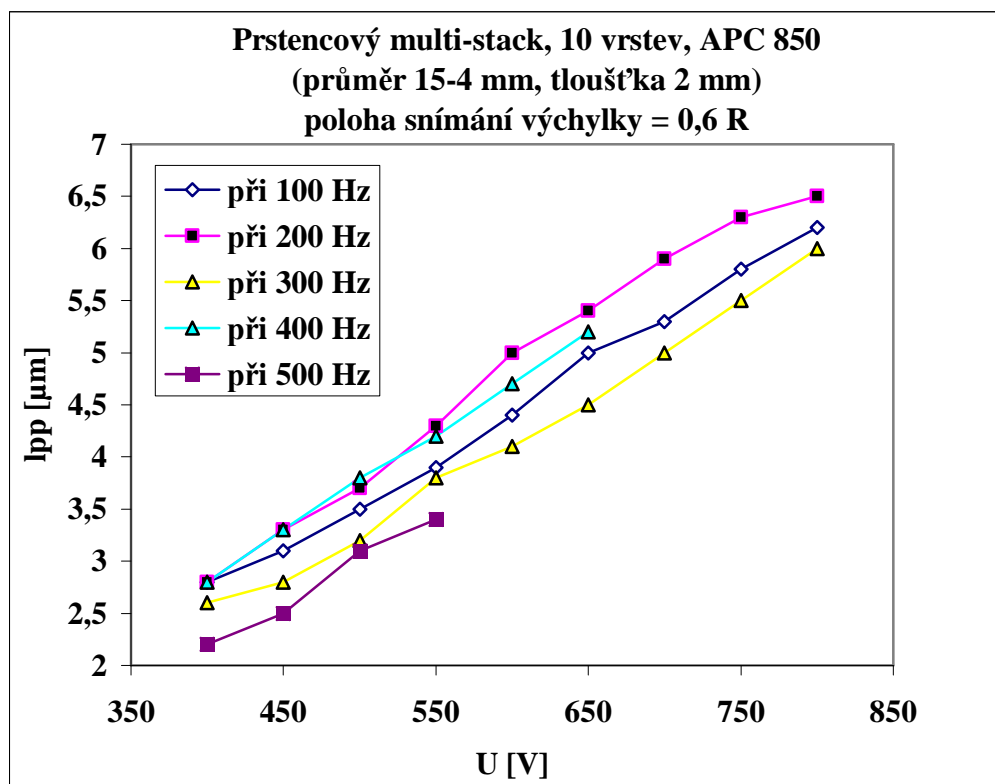


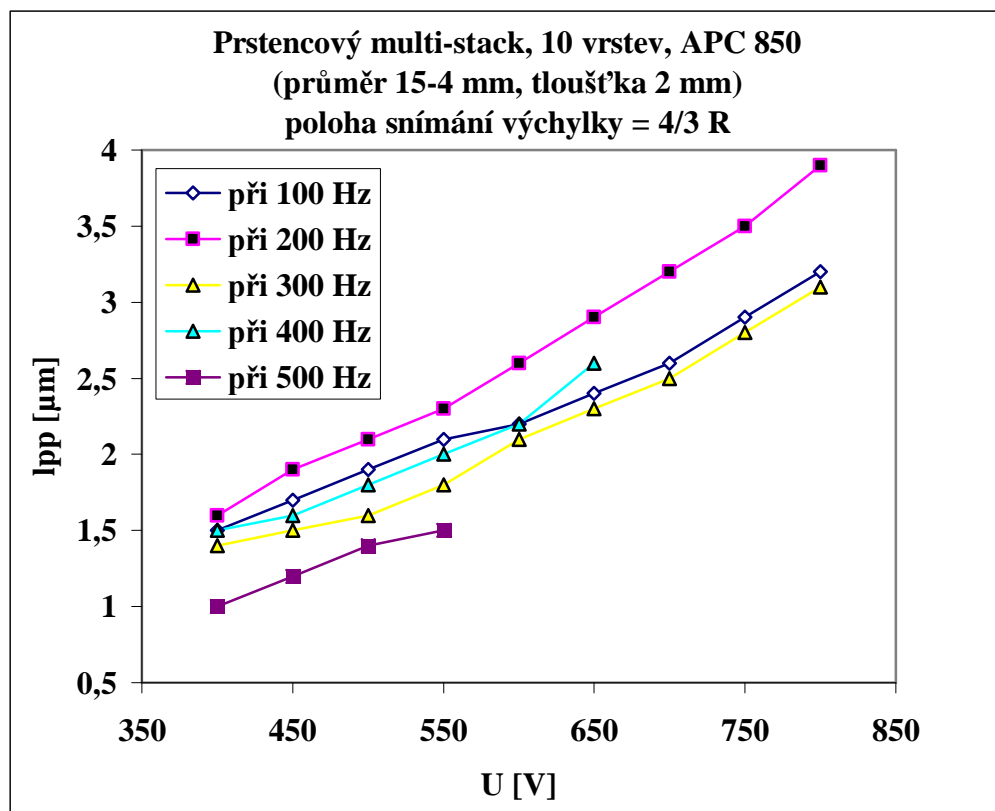












11 Literatura

- [1] J. Erhart: Piezoelektrické "chytřé" materiály pro elektrotechniku, PZT keramika, Elektro 11 (2002) 4-7
- [2] C. Niezrecki, D. Brei, S. Balakrishnan, A. Moskalik: Piezoelectric Acuation: State of the Art, The Shock and Vibration Digest 33, 4 (2001) 269-280
- [3] Piezoelectric ceramics: Principles and Applications, APC International Ltd., 2002
- [4] J. Erhart: Tloušťkově rozpínavé a tloušťkově střižné kmity piezoelektrických keramických rezonátorů, studijní text
- [5] www.americanpiezo.com
- [6] Manuál optického čidla MTI-2100 FOTONIC SENSOR, www.mtiinstruments.com
- [7] www.noliac.com